CANMET

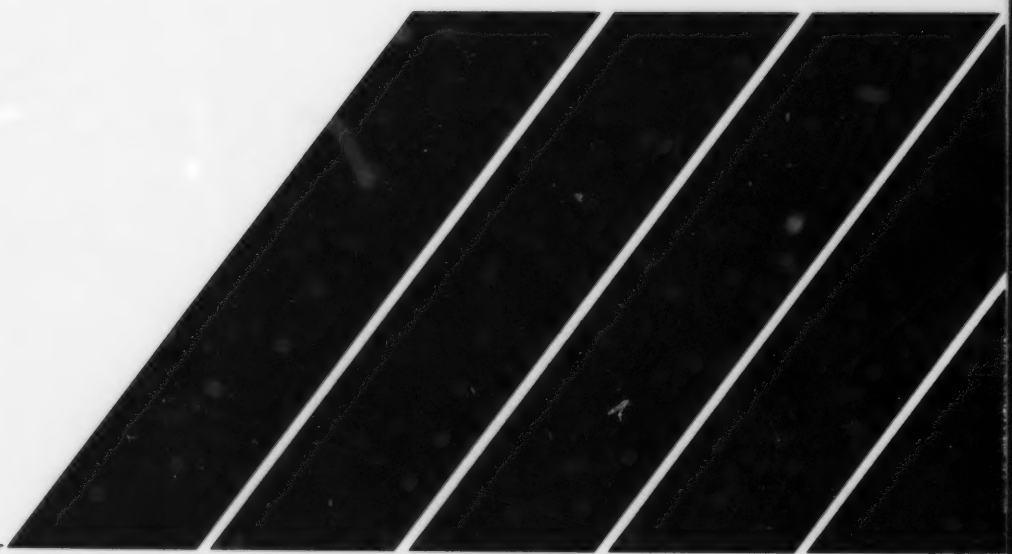
Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Efficiency and Alternative Energy Technology Branch

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement

AXES DE RECHERCHE SUR LES CYCLES À ABSORPTION



Energy, Mines and Resources Canada

Énergie, Mines et Ressources Canada

Canada

THE ENERGY OF OUR RESOURCES · THE POWER OF OUR IDEAS

L'ENERGIE DE NOS RESSOURCES · NOTRE FORCE CREATRICE

AXES DE RECHERCHE SUR LES CYCLES À ABSORPTION

PRÉPARÉ POUR:

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique
et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
Ottawa (Ontario)
Contrat MAS Nº 23440-0-9507
Octobre 1990

PRÉPARÉ PAR:

Centre de recherche industrielle du Québec
333, rue Franquet
C.P. 9038
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

MICROMEDIA

14 pp

AUTHORITÉ SCIENTIFIQUE:

Robert Calinot
Direction de la technologie de l'efficacité énergétique
et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

CITATION

Painchaud, Guy, Centre de recherche industrielle du Québec. *Axes de recherche sur les cycles à absorption.* Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (Ontario) 1990 (74 pp.)

Pour obtenir des exemplaires du présent rapport s'adresser à la :

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique
et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4

ou

Division des services bibliothèque et de documentation
CANMET
Énergie, Mines et Ressources Canada
562, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0G1

NOTE

Le présent rapport est diffusé à titre documentaire uniquement. Il ne traduit pas nécessairement l'opinion du gouvernement du Canada et ne constitue pas une recommendation d'aucun produit commercial ou d'aucune personne. Ni le Canada, ni ses ministres, agents, employés ou manadataires ne donnent de garantie à l'égard du présent rapport et n'assument aucune responsabilité liée au présent rapport.

Ce projet a été financé à une contribution du Bureau de recherche et développement énergétiques d'Énergie, Mines et Ressources Canada.

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
N° de catalogue M91-7/202-1992F
ISBN 0-662-97768-8

AXES DE RECHERCHE SUR LES CYCLES A ABSORPTION

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1
EXECUTIVE SUMMARY 1-a

2. REVUE DES PRINCIPAUX CYCLES 2

2.1 Cycle de base d'une PACA 2
2.2 Cycle de base d'un transformateur de chaleur 3
2.3 Cycle combiné compression/absorption 4
2.4 Cycle d'une PACA à double effet 5
2.5 Cycle d'une PACA à double saut thermique 5
2.6 Cycle d'un transformateur de chaleur à double effet 6
2.7 Cycle d'un transformateur de chaleur à double saut thermique .. 6
2.8 Cycle compression/absorption à double saut thermique 6
2.9 Cycle d'une PACA à triple effet 7
2.10 Cycle d'une PACA à deux boucles 7
2.11 Cycle d'une PACA à échange à chaleur générateur/absorbeur 7
2.12 Cycle d'une PACA/transformateur de chaleur 8

3. ÉTAT ACTUEL DE LA TECHNOLOGIE 21

3.1 Systèmes sur le marché 21

3.1.1 PACA de base 21
3.1.2 Transformateur de chaleur de base 21
3.1.3 Système combiné compression/absorption 22
3.1.4 PACA à double effet 22
3.1.5 Autres systèmes 22

3.2 Systèmes en phase R & D 23

3.2.1 PACA de base 23
3.2.2 Transformateur de chaleur de base 23
3.2.3 Système combiné compression/absorption 23
3.2.4 PACA à double effet 23
3.2.5 PACA à double saut thermique 24
3.2.6 Transformateur de chaleur à double effet 24
3.2.7 Transformateur de chaleur à double saut thermique 24
3.2.8 Système compression/absorption à double saut thermique 24
3.2.9 PACA à triple effet 25
3.2.10 PACA à deux boucles 25
3.2.11 PACA à échange de chaleur générateur/absorbeur (GAX).... 25
3.2.12 PACA/transformateur de chaleur 25

/... ii

4. GROUPES ET ACTIVITÉS DE R & D 29

4.1 Autriche 29
4.2 Danemark 29
4.3 États-Unis 30
4.4 France 34
4.5 Italie 35
4.6 Japon 35
4.7 Pays-Bas 36
4.8 République Fédérale d'Allemagne 37
4.9 Royaume-Uni 40
4.10 Suède 40
4.11 Suisse 40
4.12 Yougoslavie 41

5. UTILISATIONS EXISTANTES 41

5.1 Secteur résidentiel 41
5.2 Secteur commercial 42
5.3 Secteur industriel 42

6. UTILISATIONS POTENTIELLES AU CANADA 44

6.1 Secteur résidentiel 44
6.2 Secteur commercial 46
6.3 Secteur industriel 47

7. RECOMMANDATIONS 48

7.1 Critères de sélection 49

7.1.1 Potentiel de l'application visée 49
7.1.2 Simplicité du système 49
7.1.3 Durée anticipée de la R & D 49
7.1.4 Possibilité d'apporter une contribution originale 50

7.2 Secteur résidentiel 50
7.3 Secteur commercial 51
7.4 Secteur industriel 51
7.5 Futur programme de R & D 52

ANNEXE A: CONTACTS PROFESSIONNELS
ANNEXE B: OUTILS DE COMMUNICATIONS
ANNEXE C: FICHES TECHNIQUES DES UTILISATIONS INDUSTRIELLES
ANNEXE D: ACRONYMES
BIBLIOGRAPHIE

1.0 INTRODUCTION

Lors de récentes conférences sur les pompes à chaleur, un intérêt grandissant s'est manifesté pour les systèmes à absorption. La communauté scientifique internationale y voit une technologie susceptible d'accroître la diversification énergétique sans pour autant avoir de répercussions néfastes sur l'environnement. En effet, les systèmes à absorption utilisent en grande majorité des fluides de travail qui ne contribuent ni à la déplétion de la couche d'ozone, ni à l'effet de serre.

Cette technologie est bien implantée au Japon et fait l'objet de nombreux projets de recherche en Europe et aux Etats-Unis. Par contre, elle est pratiquement inconnue au Canada. Il importe donc d'y remédier dans les meilleurs délais en développant une expertise canadienne.

Le Laboratoire sur la diversification énergétique de Varennes a confié au CRIQ la tâche d'effectuer une étude exploratoire sur les pompes à chaleur à absorption (PACA). Les objectifs majeurs de cette étude sont de mettre à jour l'état actuel de la technologie, d'identifier les principaux groupes de R & D et leurs activités respectives, de déterminer les applications existantes et potentielles des PACA et d'orienter le futur programme canadien.

Les résultats de cette étude sont présentés dans ce rapport. Ils ont été obtenus à la suite de recherches bibliographiques, de discussions avec des experts, de visites scientifiques et d'une participation à un colloque international.

En première partie du rapport se trouve une revue technique des principaux cycles de PACA. Cette revue vise à familiariser le lecteur avec les systèmes à absorption et à faciliter la compréhension du reste du rapport. La section qui suit résume l'état actuel de la technologie. Cette section est séparée en deux parties. La première traite des systèmes présentement sur le marché tandis que la seconde couvre les systèmes en phase de R & D. La partie suivante est consacrée aux principaux groupes de R & D dans le monde et à leurs activités. Les coordonnées des personnes qui ont été rencontrées sont données dans l'annexe A. Il y a ensuite une section qui donne un aperçu des utilisations existantes des PACA au niveau mondial. Les utilisations sont classées dans les secteurs résidentiel, commercial ou industriel. Les utilisations potentielles des PACA au Canada sont également évaluées selon ces secteurs. Finalement, des recommandations sont faites sur l'orientation du programme de R & D canadien.

EXECUTIVE SUMMARY

Increased interest in absorption cycle systems has been shown at recent conferences on heat pumps. The international scientific community considers this technology to be a way of increasing energy diversification without harming the environment. Most absorption cycle systems use working fluids that do not contribute to ozone depletion or to the greenhouse effect.

This technology is well-established in Japan and has been the subject of a great many research projects in Europe and the United States. However, it is practically unknown in Canada. Therefore, it is important that this situation be remedied as soon as possible by developing Canadian expertise in the field.

The Energy Diversification Research Laboratory in Varennes has given CRIQ the task of undertaking exploratory research in absorption cycle heat pumps (ACHP). This research was concerned mainly with determining the current state of the technology, identifying principal R&D groups and their respective activities, identifying existing and potential applications of ACHP, and providing guidance for the future Canadian program.

The results of this research are presented in this report. They were obtained through literature surveys, discussions with experts, scientific visits, and participation at an international symposium.

The first part of the report gives a technical review of the principal ACHP cycles. It will allow readers to become familiar with absorption cycle systems and make it easier for them to understand the rest of the report. The next section is a summary of the current state of the technology and is divided into two parts. The first part covers systems that are currently on the market, while the second covers systems that are still at the R&D stage. The next section covers major R&D groups throughout the world and their activities. Appendix A gives the coordinates of people with whom we met. Another section gives an overview of the existing uses of ACHP throughout the world. Uses are classified by sector, either residential, commercial or industrial. The potential uses of ACHP in Canada are also evaluated for each of these sectors. Lastly, recommendations are made on the thrust of the Canadian R&D program.

2.0 REVUE DES PRINCIPAUX CYCLES

Ce chapitre se veut une introduction à la technologie des pompes à chaleur à absorption (PACA). Il existe une multitude de cycles possibles pour les PACA et il serait impossible de tous les présenter. Une sélection a donc été faite et 12 cycles ont été retenus. Ces cycles font l'objet de R & D ou encore sont fréquemment mentionnés dans la littérature.

Chacun des cycles est schématisé sur un diagramme de la pression en fonction de la température et brièvement commenté. Les commentaires sont d'ordre général et plutôt qualitatifs. Des données plus techniques telles les conditions d'opération ou les limites du cycle sont mentionnées dans les chapitres subséquents.

Trois cycles à absorption de base sont présentés en premier lieu. Ce sont les cycles de la pompe à chaleur, du transformateur de chaleur et le cycle combiné compression/absorption. Les cycles suivants sont soit des combinaisons des cycles de base, soit des cycles de base modifiés.

2.1 CYCLE DE BASE D'UNE PACA

Le cycle de base des pompes à chaleur est représenté sur la figure 2.1. Ce cycle sert à retirer de la chaleur à une température relativement basse pour la réinjecter à une température supérieure. Il comporte une pompe, deux vannes de détente et un minimum de 4 échangeurs de chaleur. Ces échangeurs sont : un générateur, un condenseur, un évaporateur et un absorbeur. Le cycle travaille à deux niveaux de pression. Le générateur et le condenseur opèrent à haute pression tandis que l'évaporateur et l'absorbeur opèrent à basse pression. De la même façon, on retrouve trois niveaux de température dans le cycle : l'évaporateur opère à basse température, le générateur à haute température tandis que le condenseur et l'absorbeur opèrent à une température moyenne qui n'est pas nécessairement la même dans les deux cas. Les réactions au générateur et à l'évaporateur sont endothermiques alors que les réactions au condenseur et à l'absorbeur sont exothermiques.

Le générateur contient un mélange liquide d'un réfrigérant et d'un absorbant. Le générateur est chauffé à la température t_h et à la pression P_h, et la quantité de chaleur transmise Q_G sert à évaporer une partie du réfrigérant du mélange. Le réfrigérant est ensuite condensé à température t_m et à la pression P_h, libérant la quantité de chaleur Q_C. Le réfrigérant liquide passe alors à travers une vanne de détente avant d'entrer dans l'évaporateur où il est évaporé à la pression P_b et à la température t_b en absorbant la quantité de chaleur Q_E. Le réfrigérant sous forme de vapeur est ensuite absorbé dans l'absorbeur par la solution pauvre venant du générateur. Cette réaction libère la quantité de chaleur Q_A à la pression P_b et à la température t_m. La solution, maintenant riche, est repompée jusqu'au générateur. La solution est dite pauvre à la sortie du générateur puisqu'elle a été séparée d'une partie de son réfrigérant. La solution est

dite riche à l'entrée du générateur puisque la concentration en réfrigérant y est alors à son maximum.

Le coefficient de performance (COP) du cycle est défini comme étant le rapport entre la quantité de chaleur utile et la quantité de chaleur d'entraînement. Pour la réfrigération, on obtient : $COP_R = \frac{Q_E}{Q_G}$

et pour le chauffage : $COP_C = \frac{Q_C + Q_A}{Q_G}$

Les COP idéaux pour ce cyle sont de 1 en réfrigération et de 2 en chauffage.

Il est souvent avantageux d'installer un cinquième échangeur de chaleur entre les solutions quittant et entrant dans le générateur. On augmente ainsi le COP. De plus, pour certaines paires de fluides (réfrigérant et absorbant), un processus de rectification est installé à la sortie du générateur. Ce processus permet de condenser les vapeurs d'absorbants qui auraient pu se former.

Il est à noter que les processus de génération et d'absorption ne se font pas à une température fixe mais dans un intervalle de température. Cela s'explique par la température d'équilibre du réfrigérant, qui à une pression donnée, varie selon sa concentration dans le mélange, qui elle-même change le long de l'absorbeur et du générateur.

Ce cycle est souvent appelé le cycle d'une PACA de type I pour le distinguer du cycle qui suit.

Référence : 43.

2.2 CYCLE DE BASE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR (PACA DE TYPE II)

Ce cycle, représenté sur la figure 2.2, est surtout utilisé dans l'industrie pour recycler de la chaleur résiduaire. Ainsi, il transforme de la chaleur à moyenne température en chaleur à basse température et à haute température, d'où son appellation. Cette chaleur à haute température peut ensuite être réinjectée dans un procédé.

Tout comme le cycle d'une PACA de type I, ce cycle nécessite 4 échangeurs de chaleur : un générateur, un condenseur, un évaporateur et un absorbeur. Par contre, ce sont l'évaporateur et l'absorbeur qui travaillent à haute pression tandis que le générateur et le condenseur fonctionnent à basse pression. Pour ce qui est des températures, le condenseur opère à basse température, le générateur et l'évaporateur à moyenne température et l'absorbeur à haute température. De plus, le cycle nécessite une vanne de détente et deux pompes.

La solution dans le générateur est chauffée à t_m et à P_b. La quantité de chaleur Q_G est transmise à la solution et une partie du réfrigérant est évaporée. Le réfrigérant est ensuite condensé dans le condenseur qui rejette la quantité de chaleur Q_C à t_b et à P_b. Le réfrigérant maintenant liquide est alors pompé jusqu'à l'évaporateur où il est réévaporé et à P_h et t_m, absorbant du même coup la quantité de chaleur Q_E. Puis dans l'absorbeur, le réfrigérant est absorbé par la solution pauvre en réfrigérant venant du générateur. Cette réaction dégage la quantité de chaleur Q_A à t_h et P_h. La solution maintenant riche est retournée au générateur et le cycle peut recommencer.

Le coefficient de performance du cycle est défini par : $COP = \frac{Q_A}{Q_E + Q_G}$

et atteint 0,5 idéalement.

Le COP peut être augmenté dans plusieurs cas en ajoutant un échangeur de chaleur entre la solution riche quittant l'absorbeur et la solution pauvre y entrant.

Notons que ce cycle ne nécessite pas un apport de chaleur à haute température. Le cycle est entraîné par de la chaleur résiduaire à t_m. Ce cycle est bien adapté aux utilisations où la chaleur de rejet à t_m est largement supérieure à la chaleur requise à t_h. Les transformateurs de chaleur sont évalués selon deux critères : le COP et le saut de température permis, soit t_h-t_m.

Références : 3, 17, 21, 42.

2.3 CYCLE COMBINÉ COMPRESSION/ABSORPTION

Aussi appelé cycle hybride, ce cycle est schématisé sur la figure 2.3. Il sert à récupérer de la chaleur à basse température pour la réinjecter à haute température. Il est plus performant que le cycle de base d'une PACA de type I pour des utilisations exigeant des températures relativement hautes. Il comprend deux échangeurs de chaleur, l'absorbeur et le générateur, une pompe, un compresseur et une vanne de détente.

La solution dans le générateur est chauffée à P_b et t_b. Une partie du réfrigérant est évaporée et ensuite compressée. Une fois dans l'absorbeur, il est absorbé par la solution pauvre acheminée du générateur à l'absorbeur par une pompe. L'absorption dégage la quantité de chaleur Q_A à t_h et P_h. La solution riche est ensuite retournée au générateur.

En chauffage, le COP s'exprime par : $COP_C = \frac{Q_A}{W}$

En réfrigération : $COP_R = \frac{Q_G}{W}$

Comme dans pratiquement tous les systèmes à absorption, le travail fourni par la pompe est négligeable.

Références : 44, 45.

2.4 CYCLE D'UNE PACA À DOUBLE EFFET

Ce cycle vise les mêmes utilisations que le cycle de base d'une PACA de type I. Toutefois on peut s'attendre à un COP supérieur, le prix à payer étant l'augmentation de l'investissement initial. Cette augmentation est causée principalement par l'ajout de deux échangeurs de chaleur, soit un deuxième condenseur et un deuxième générateur.

La figure 2.4 montre bien que le cycle peut être considéré comme un cycle de base auquel un second générateur et condenseur ont été incorporés, créant par le fait même un troisième niveau de pression. Si l'on compare ce cycle avec le cycle de base, on constate que pour une chaleur d'entraînement donnée, Q_{G1}, la quantité de réfrigérant générée sera plus grande dans le cas du cycle à double effet à cause du second générateur (le second effet). Une plus grande quantité de réfrigérant entraîne des plus grands Q_{E1} et Q_{A1} pour le même Q_{G1}, toujours par rapport au cycle de base. La chaleur d'entraînement fournie au second générateur venant du premier condenseur, Q_{C1}, donc interne au système, n'apparait pas dans le bilan externe du système. Les COP, dont la définition suit, s'en trouvent ainsi améliorés:

$$COP_C = \frac{Q_{C2} + Q_A}{Q_{G1}} \quad ; \quad COP_R = \frac{Q_{E1}}{Q_{G1}}$$

Références : 20, 46.

2.5 CYCLE D'UNE PACA À DOUBLE SAUT THERMIQUE

Ce cycle sert à retirer de la chaleur à basse température pour la réinjecter à une température plus élevée. Ce saut de température est environ deux fois plus grand que celui permis par le cycle de base. Toutefois, ce gain au niveau des températures se fait au détriment du COP, comme le montre la figure 2.5.

Ce cycle peut être considéré comme un cycle de base auquel on a rajouté un deuxième évaporateur et un deuxième absorbeur. La chaleur dégagée par le premier absorbeur, Q_{A1}, sert à évaporer le réfrigérant dans le second évaporateur. Il est à noter que ce cycle utilise les mêmes composantes que le cycle à double effet, la seule différence étant l'utilisation faite de deux des échangeurs de chaleur.

Les COP sont définis comme suit :

$$COP_C = \frac{Q_{C1} + Q_{A2}}{Q_G} \quad ; \quad COP_R = \frac{Q_{E1}}{Q_G}$$

Référence : 12.

2.6 CYCLE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR À DOUBLE EFFET

Ce cycle est le penchant du cycle de la PACA de type I à double effet pour un transformateur de chaleur. Comme l'indique la figure 2.6, un générateur et un condenseur sont ajoutés au cycle de base de la PACA de type II. La chaleur rejetée par le deuxième condenseur, Q_{C2}, est utilisée pour entraîner le premier générateur. Ce COP de ce cycle est meilleur que celui du cycle de base. Il est défini par : $COP = \frac{Q_A}{Q_E + Q_{G2}}$

Comme tous les cycles à deux étages, le cycle fonctionne à trois niveaux de pression différents.

Références : 3,17.

2.7 CYCLE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR À DOUBLE SAUT THERMIQUE

Ce cycle est représenté sur la figure 2.7. On reconnait le cycle de base auquel ont été ajoutés un second évaporateur et un second absorbeur. On espère avec ce cycle pouvoir recycler de la chaleur résiduaire à un niveau supérieur à celui permis par le cycle de base. Ce saut de température plus élevé se fait au détriment du COP, ici défini par : $COP = \frac{Q_{A1}}{Q_{E2} + Q_G}$

Dans ce cas-ci, la chaleur dégagée par le second absorbeur, Q_{A2}, sert à évaporer le réfrigérant dans le premier évaporateur.

Références : 3,17.

2.8 CYCLE COMPRESSION/ABSORPTION À DOUBLE SAUT THERMIQUE

Comme son nom l'indique, ce cycle permet d'augmenter grandement le saut thermique. Dû à l'écart important entre les températures de récupération et de rejet de la chaleur (t_h-t_b), le cycle réalise son plein potentiel dans des utilisations nécessitant la production simultanée de réfrigération et d'eau chaude. On voit sur la figure 2.8 qu'une partie de la chaleur de condensation, Q_C, sert de chaleur d'entraînement au générateur. Une partie du réfrigérant compressé est absorbée alors que le reste est condensé. En variant les portions de réfrigérant absorbé et condensé, il est possible d'ajuster la production de réfrigération et de chaleur selon les besoins. Il s'agit donc d'un système très flexible. Les COP de cette machine sont définis comme suit :

$$COP_C = \frac{Q_A}{W} \quad ; \quad COP_R = \frac{Q_E}{W}$$

Références : 13, 44, 47.

2.9 CYCLE D'UNE PACA À TRIPLE EFFET

Ce cycle est illustré à la figure 2.9. Les utilisations visées par ce cycle sont pratiquement les mêmes que pour un cycle de base d'une PACA de type I. Toutefois, le COP d'un cycle à triple effet est nettement supérieur et à celui du cycle de base et à celui du cycle à double effet. Le COP est donné par:

$$COP_C = \frac{Q_{C2} + Q_{A2}}{Q_{G1}} \quad ; \quad COP_R = \frac{Q_{E1} + Q_{E2}}{Q_{G1}}$$

Le COP idéal en chauffage est de quatre et de trois en réfrigération.

Le cycle comporte deux circuits distincts, chacun des circuits pouvant utiliser sa propre solution de travail. Il n'y a aucun échange de masse entre les deux circuits, seul des échanges de chaleur interviennent. Ainsi, la chaleur perdue par les premiers condenseur et absorbeur, $Q_{C1} + Q_{A1}$, sert de chaleur d'entraînement pour le second générateur.

Référence: 7.

2.10 CYCLE D'UNE PACA À DEUX BOUCLES

Ce cycle, représenté sur la figure 2.10, est très semblable au cycle précédent puisqu'il comporte deux circuits indépendants au niveau des échanges de masse mais s'échangeant de la chaleur.

La différence entre ce cycle et le cycle à triple effet est que la chaleur des seconds condenseur et absorbeur, $Q_{C2} + Q_{A2}$, du cycle à deux boucles est récupérée et utilisée pour évaporer le réfrigérant de la première boucle. Le surplus de chaleur est ensuite rejeté. Les COP de ce cycle sont définis par:

$$COP_C = \frac{Q_{A2} + Q_{C2} - Q_{E1}}{Q_{G1}} \quad ; \quad COP_R = \frac{Q_{E2}}{Q_{G1}}$$

Idéalement $COP_C = 3$ et $COP_R = 2$

Référence : 7.

2.11 CYCLE D'UNE PACA À ÉCHANGE DE CHALEUR GÉNÉRATEUR/ABSORBEUR (GAX)

Ce cycle est une version modifiée du cycle de base comme le montre la figure 2.11. Elle exploite le fait que les phénomènes de génération et d'absorption ne se produisent pas à une température fixe mais dans un intervalle de température (voir section 2.1). Pour le cycle GAX, ces intervalles de température se recoupent. Il y a donc une fraction de l'absorption qui se produit à plus haute température qu'une fraction de la génération. Une partie de la chaleur de l'absorbeur, $Q_{A'}$, est alors utilisée dans le générateur. On peut ainsi augmenter le COP du cycle.

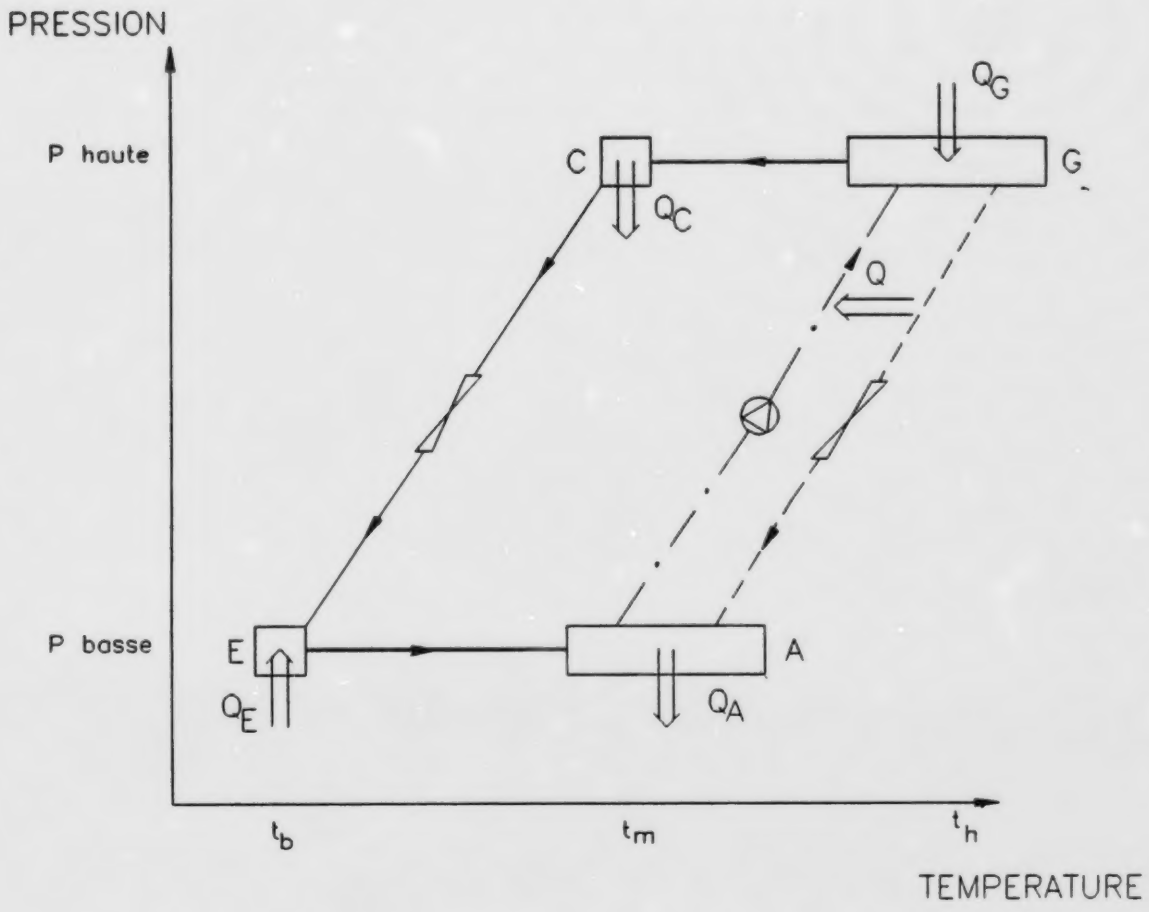
Référence: 7.

2.12 CYCLE D'UNE PACA/TRANSFORMATEUR DE CHALEUR

Le cycle est représenté à la figure 2.12. Comme son nom l'indique, il combine à la fois les fonctions d'une PACA et d'un transformateur de chaleur. Le cycle utilise deux générateurs, deux condenseurs, un évaporateur et un absorbeur. De la chaleur est fournie à haute température, t_h, au premier générateur pour entraîner le cycle. De la chaleur à une température moyenne, t_{m1}, est recyclée et rejetée à une température plus basse, t_b, et à une température supérieure, t_{m2}. Il y a également un échange de chaleur interne puisque la chaleur évacuée par le premier condenseur, Q_{C1}, est utilisé comme chaleur d'entraînement du second générateur.

Référence: 17.

CYCLE DE BASE D'UNE PACA

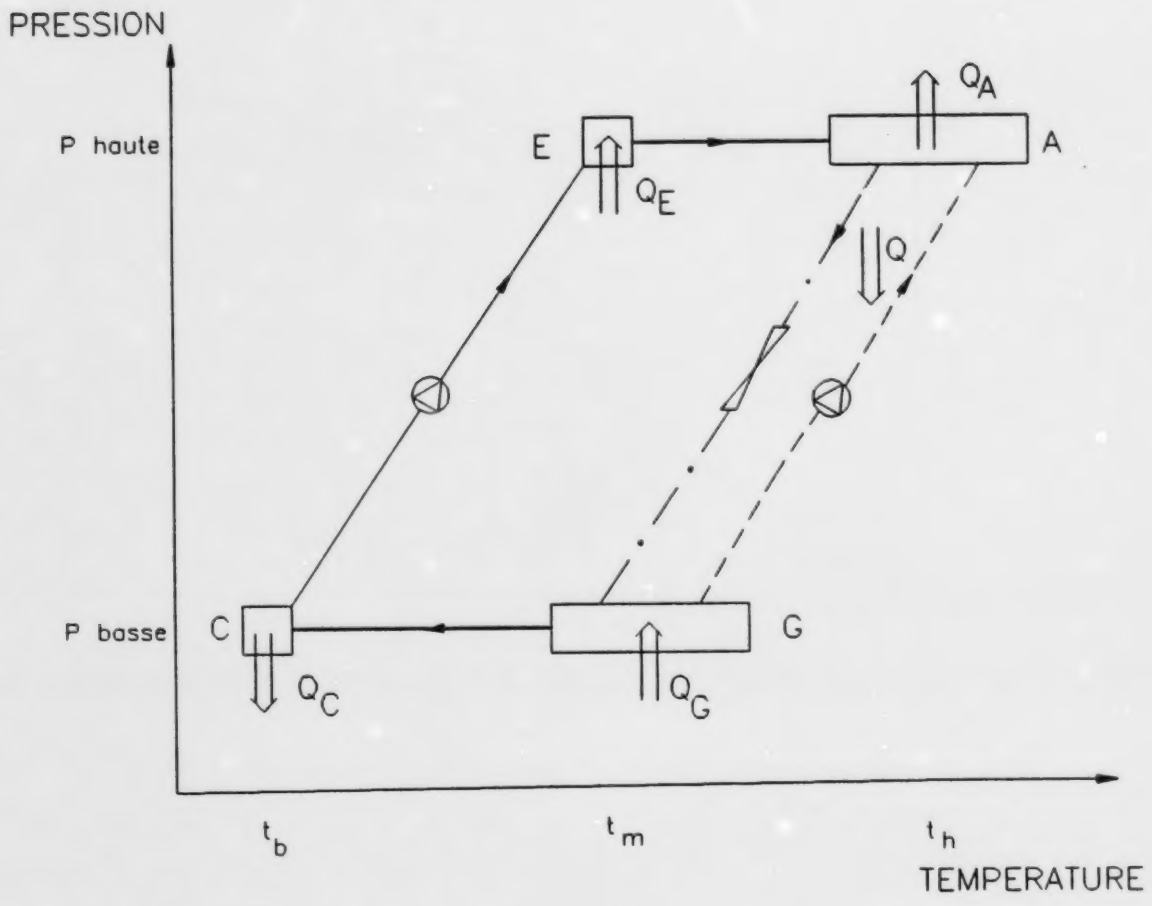


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
— . — : solution riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A: absorbeur
C: condenseur
E: évaporateur

figure 2.1

CYCLE DE BASE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR



——— : réfrigérant gazeux

——— : réfrigérant liquide

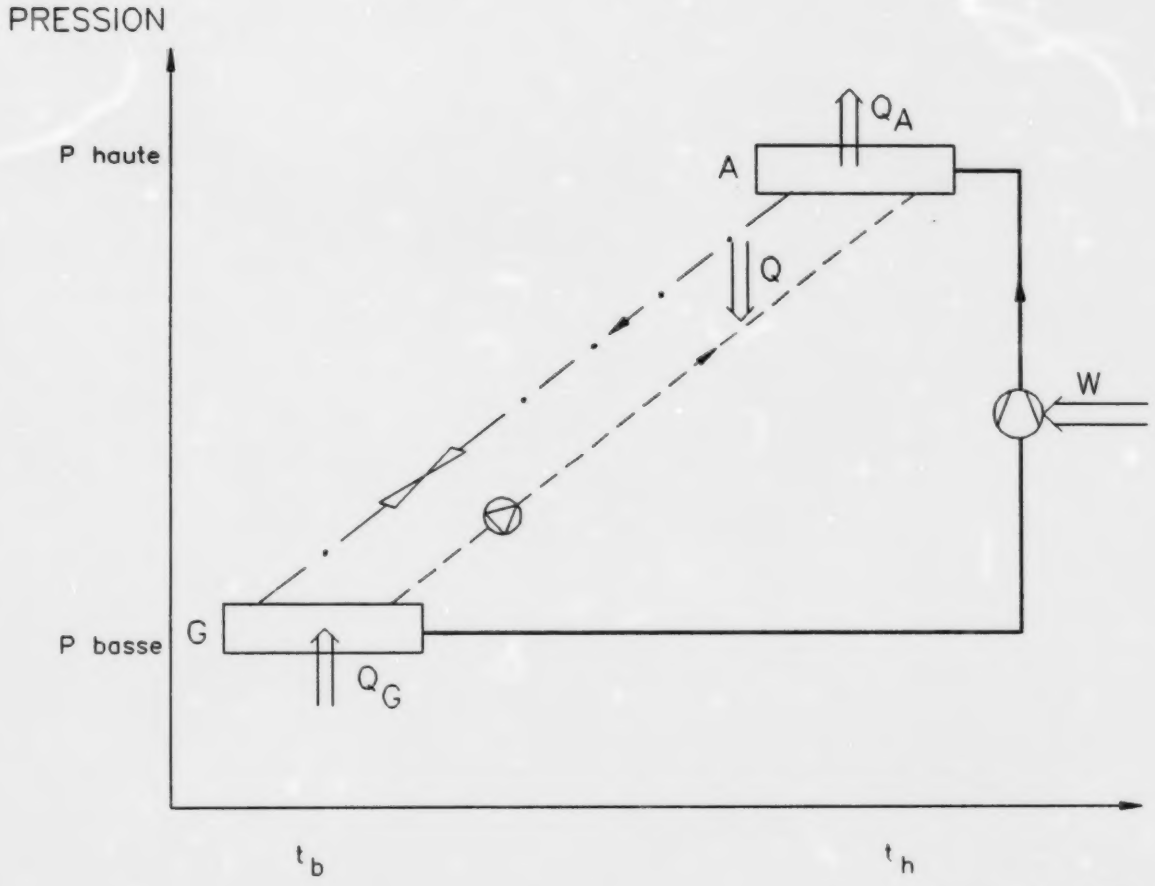
—— · —— : solution riche

– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A: absorbeur
C: condenseur
E: évaporateur

figure 2.2

CYCLE COMBINE COMPRESSION/ABSORPTION



———— : réfrigérant gazeux

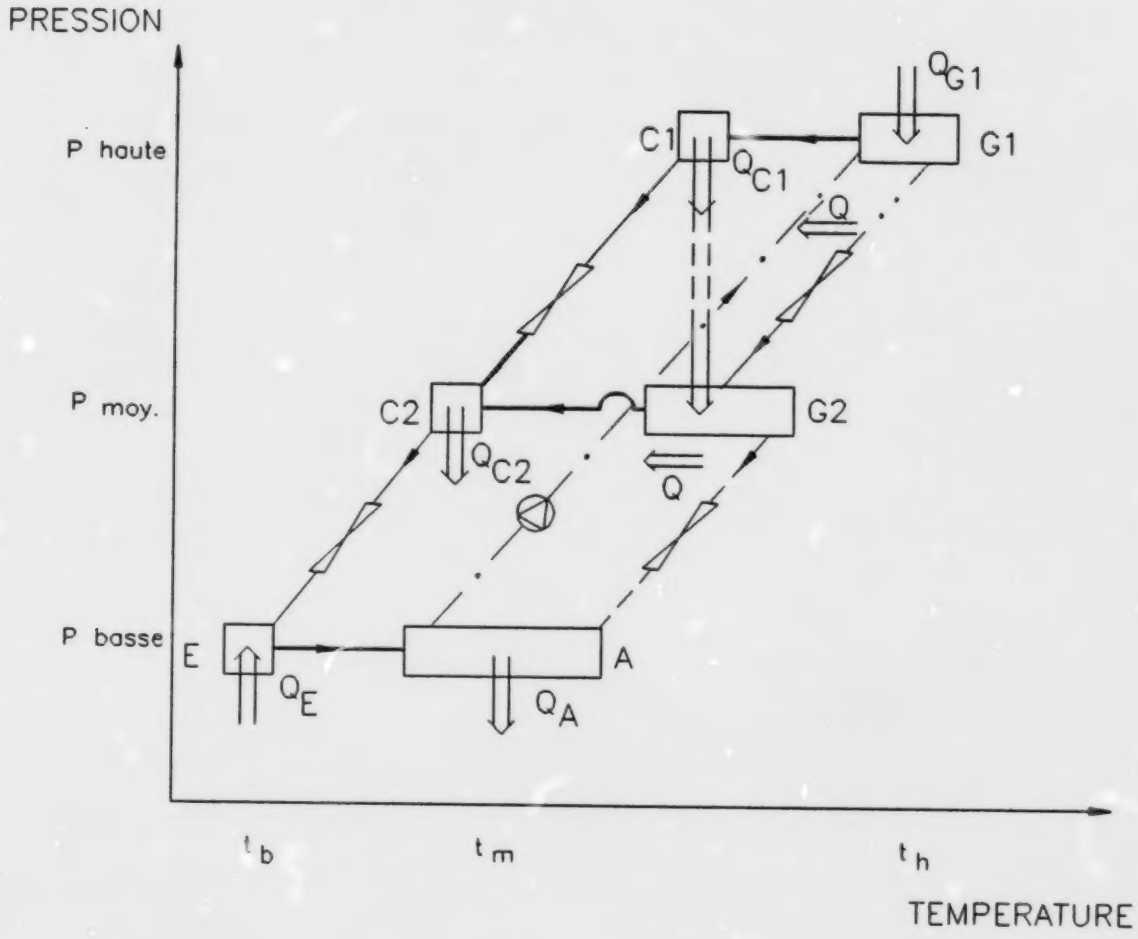
— . — : solution riche

– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A: absorbeur
W: travail du compresseur

figure 2.3

CYCLE D'UNE PACA A DOUBLE EFFET

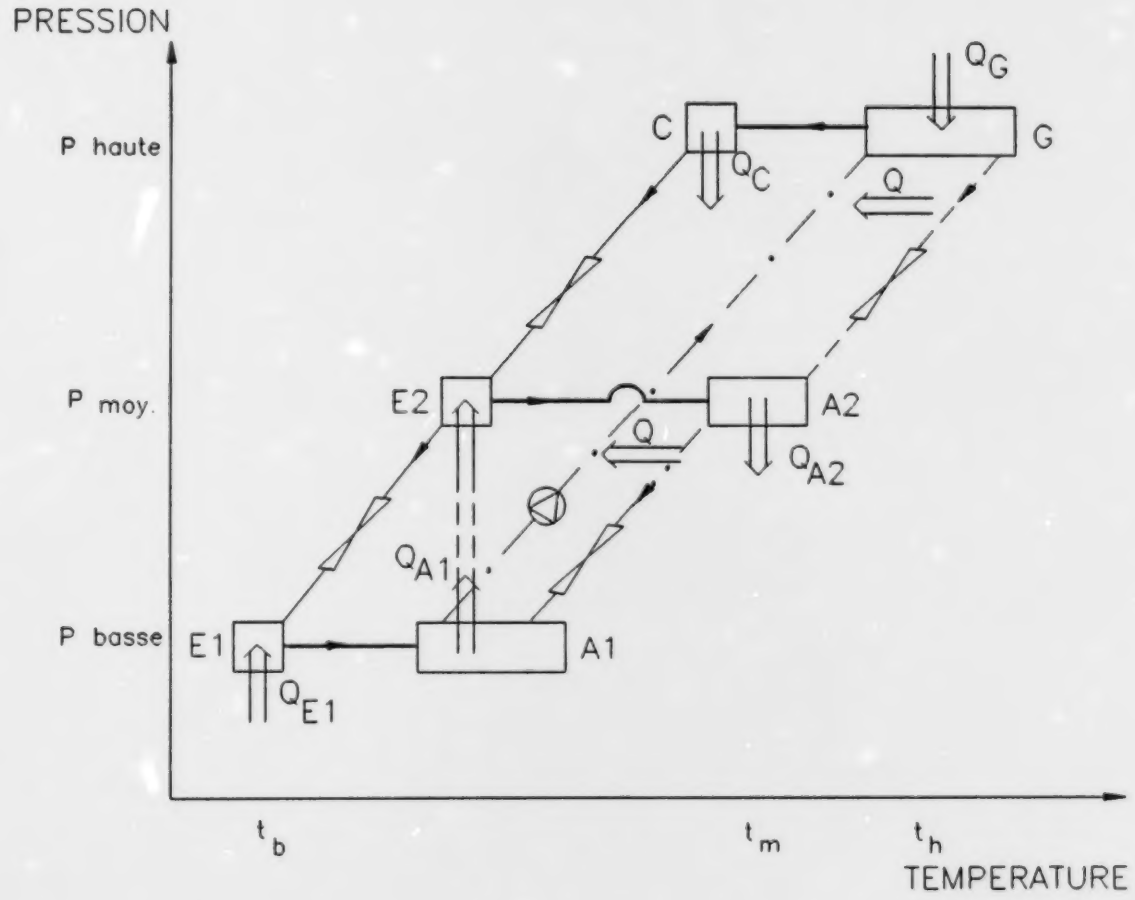


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
—— · —— : solution riche
—— ·· —— : solution moins riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G1: générateur 1
G2: générateur 2
A: absorbeur
C1: condenseur 1
C2: condenseur 2
E: évaporateur

figure 2.4

CYCLE D'UNE PACA A DOUBLE SAUT THERMIQUE

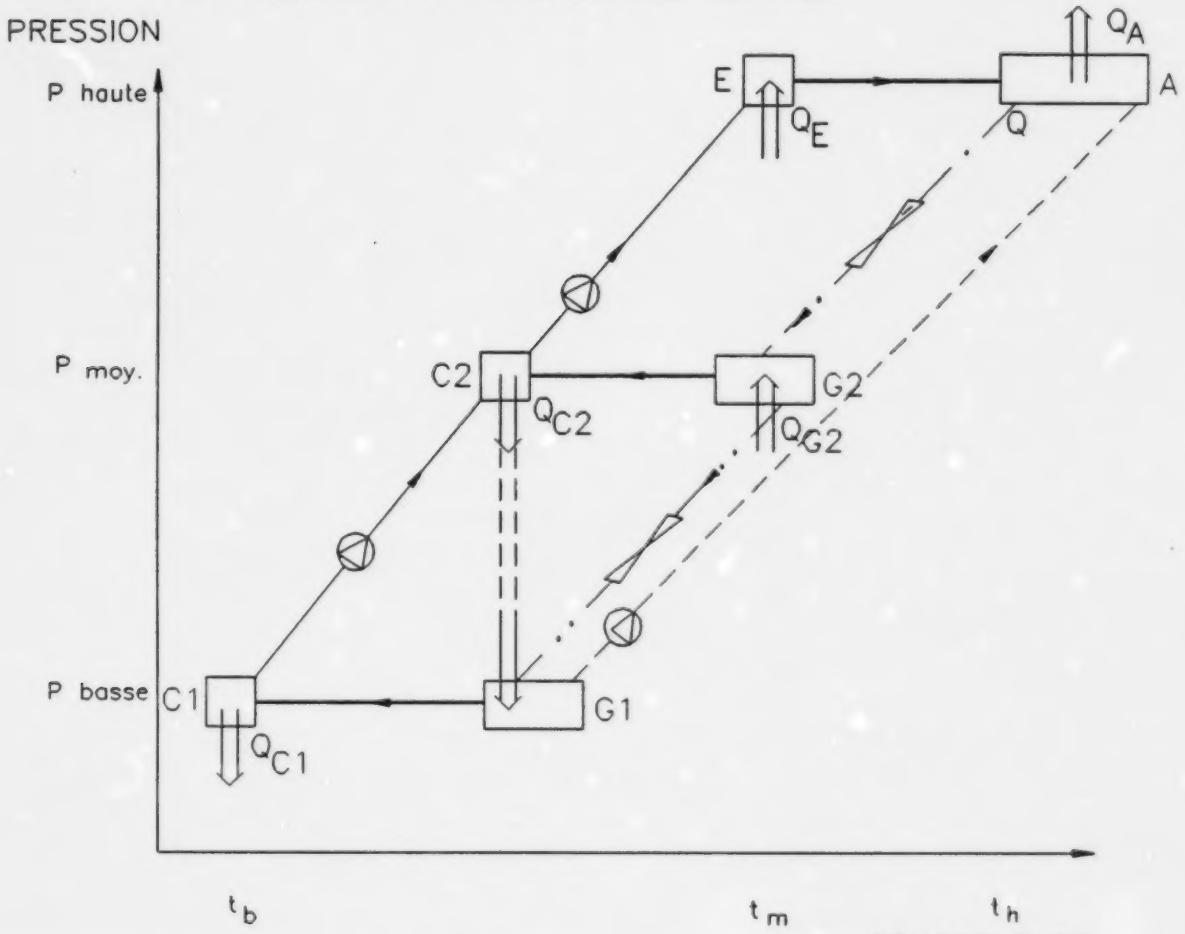


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
— . — : solution riche
— .. — : solution moins riche
– – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A1: absorbeur 1
A2: absorbeur 2
C: condenseur
E1: évaporateur 1
E2: évaporateur 2

figure 2.5

CYCLE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR A DOUBLE EFFET

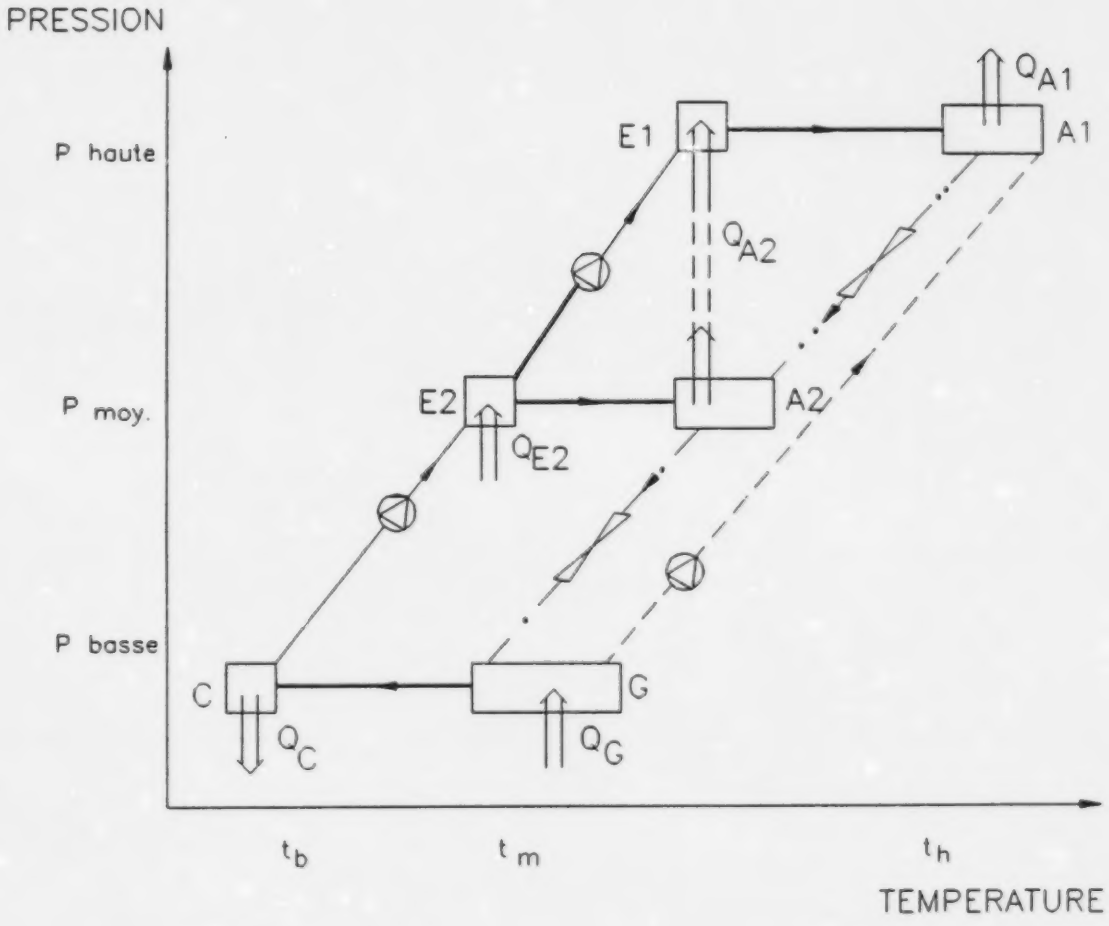


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
— . — : solution riche
— . . — : solution moins riche
– – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G1: générateur 1
G2: générateur 2
A: absorbeur
C1: condenseur 1
C2: condenseur 2
E: évaporateur

figure 2.6

CYCLE D'UN TRANSFORMATEUR DE CHALEUR A DOUBLE SAUT THERMIQUE

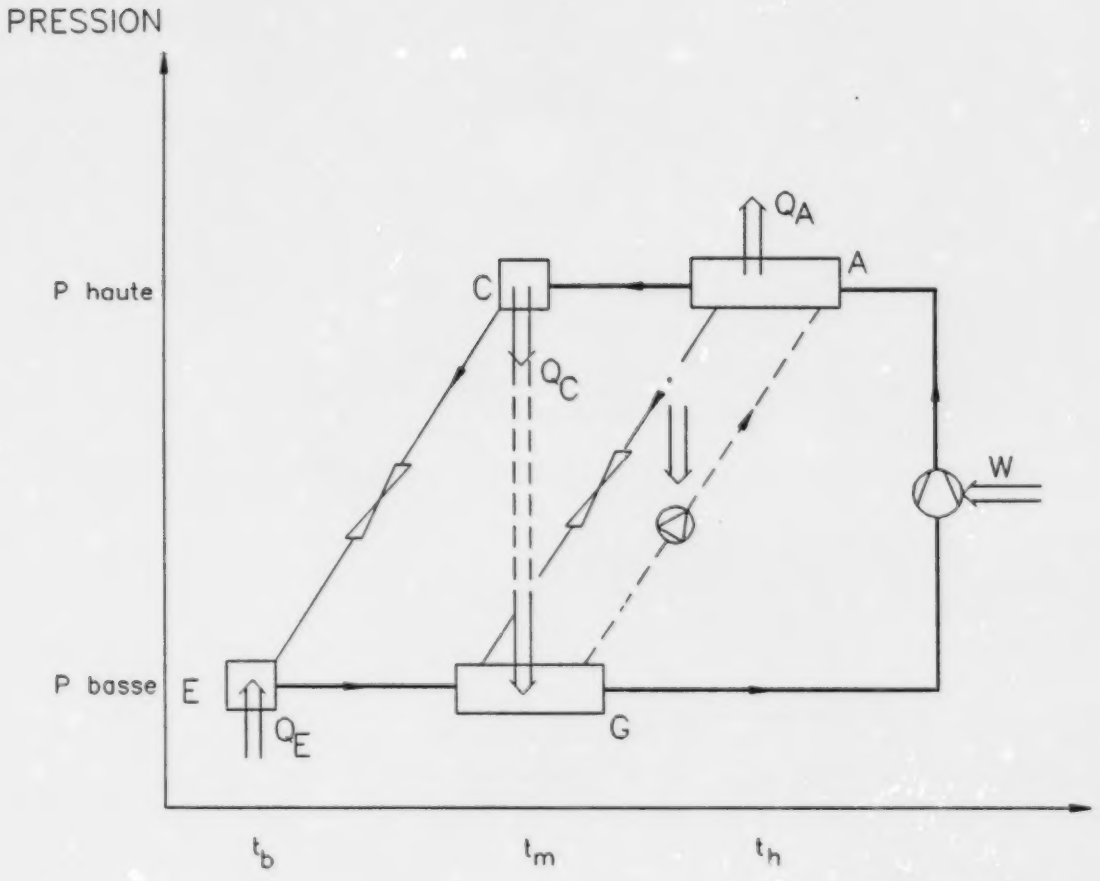


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
— . — : solution riche
— . . — : solution moins riche
– – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A1: absorbeur 1
A2: absorbeur 2
C: condenseur
E1: évaporateur 1
E2: évaporateur 2

figure 2.7

CYCLE COMPRESSION/ABSORTION A DOUBLE SAUT THERMIQUE

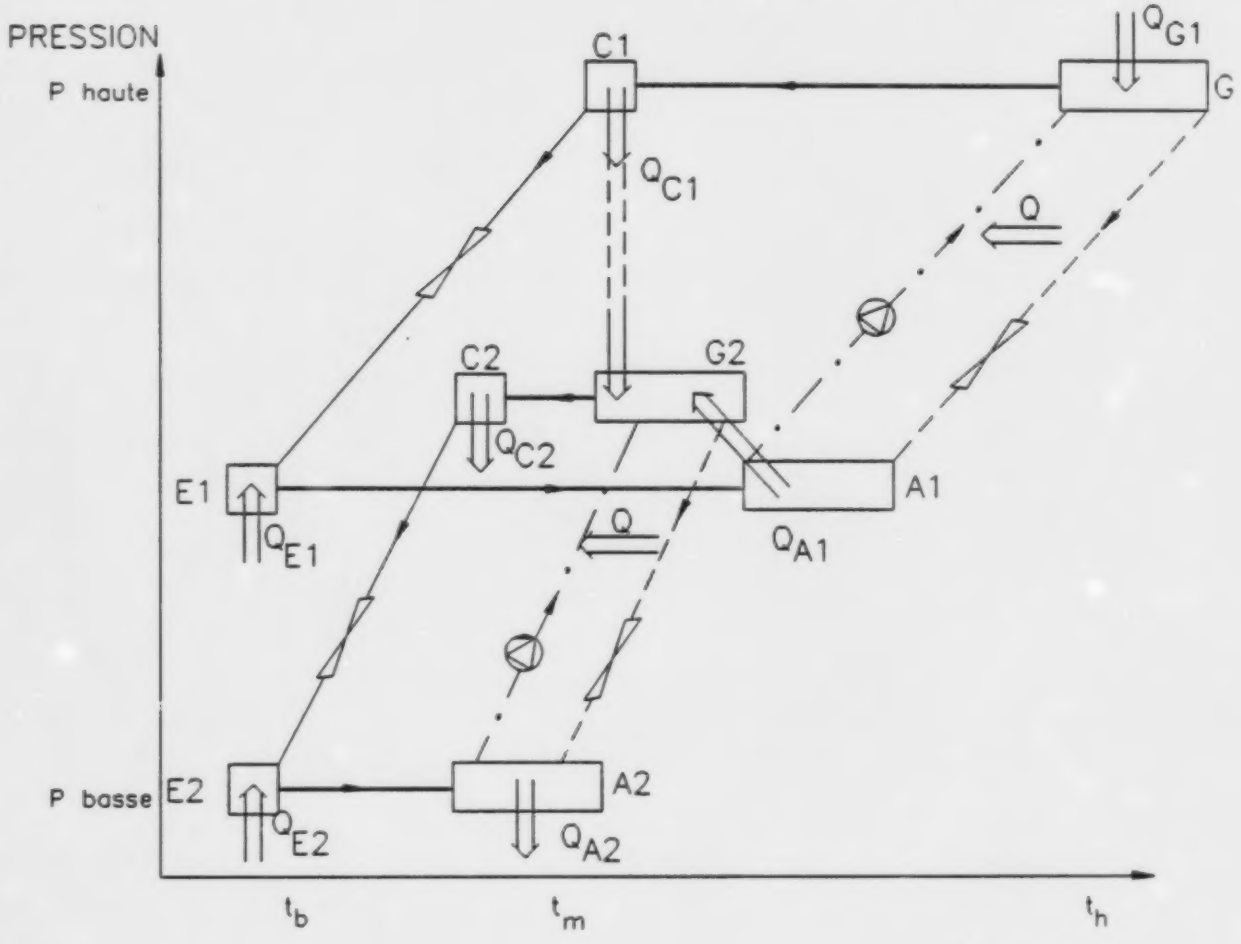


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
— · — : solution riche
– – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A: absorbeur
C: condenseur
E: évaporateur
W: travail du compresseur

figure 2.8

CYCLE D'UNE PACA A TRIPLE EFFET

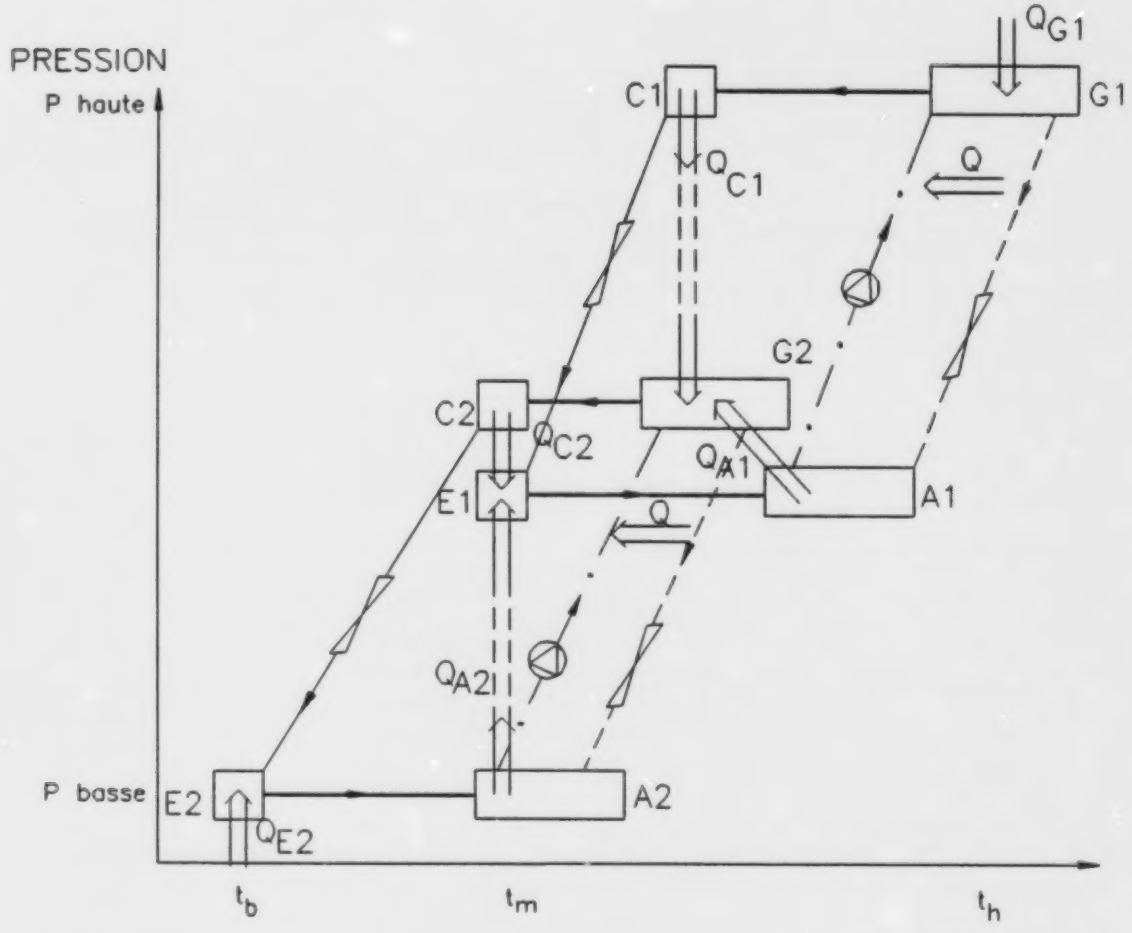


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
—— . —— : solution riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G1: générateur 1
G2: générateur 2
A1: absorbeur 1
A2: absorbeur 2
C1: condensur 1
C2: condenseur 2
E1: évaporateur 1
E2: évaporateur 2

figure 2.9

CYCLE D'UNE PACA A DEUX BOUCLES

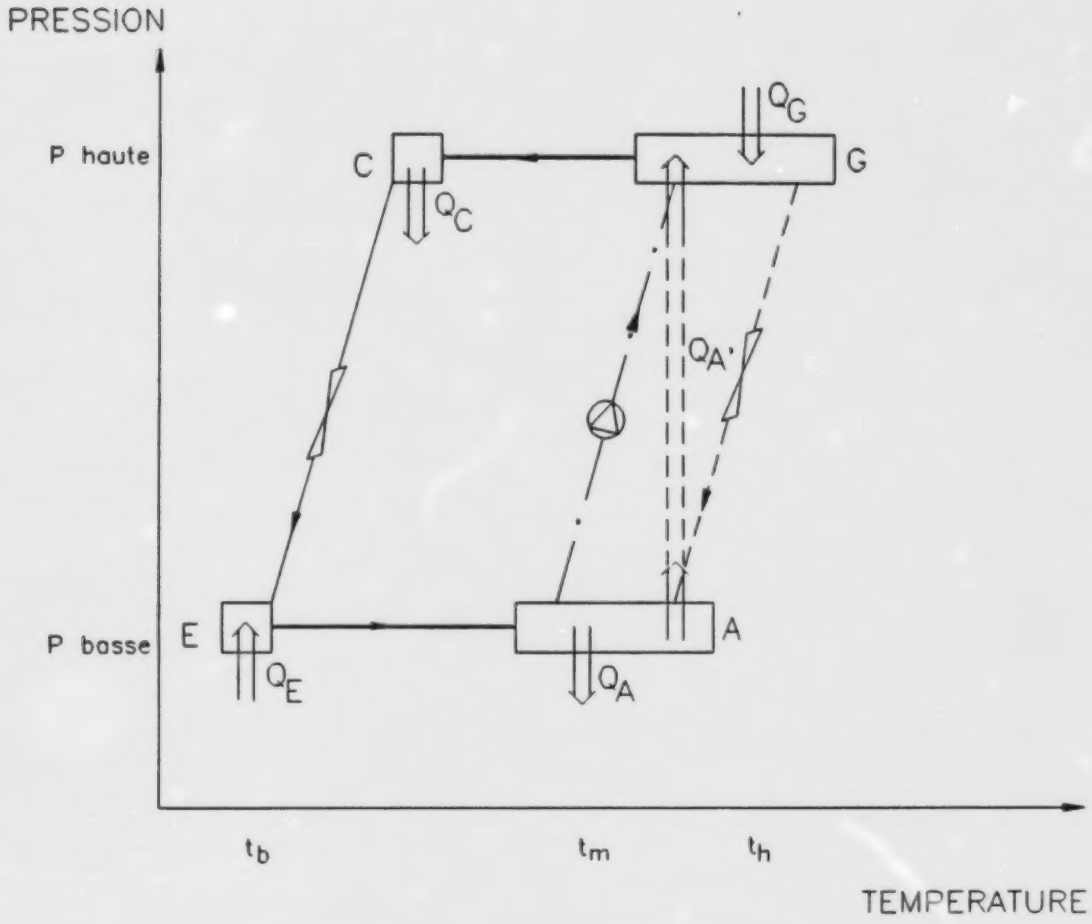


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
—— . —— : solution riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G1: générateur 1
G2: générateur 2
A1: absorbeur 1
A2: absorbeur 2
C1: condenseur 1
C2: condenseur 2
E1: évaporateur 1
E2: évaporateur 2

figure 2.10

CYCLE D'UNE PACA A ECHANGE DE CHALEUR GENERATEUR/ABSORBEUR (GAX)

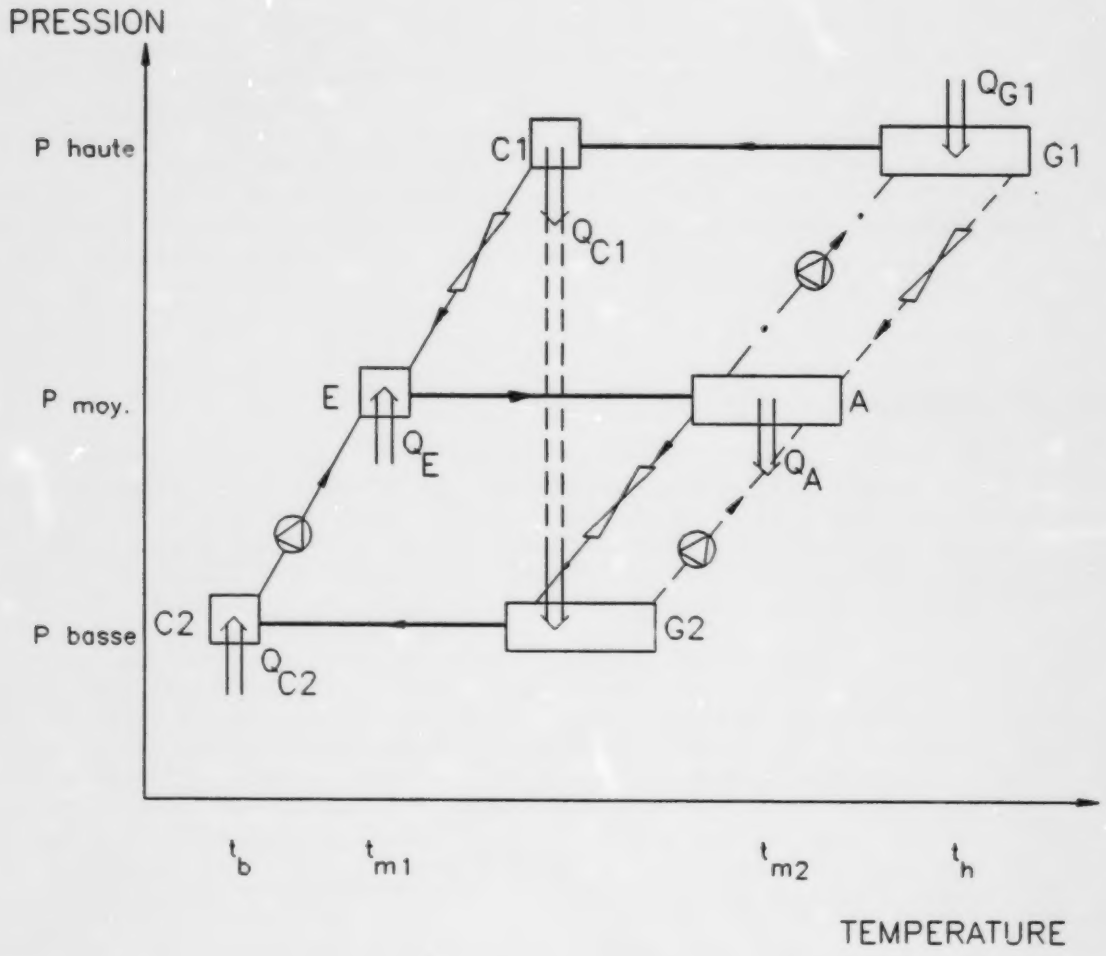


——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
—— . —— : solution riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G: générateur
A: absorbeur
C: condenseur
E: évaporateur

figure 2.11

CYCLE D'UNE PACA/TRANSFORMATEUR DE CHALEUR



——— : réfrigérant gazeux
——— : réfrigérant liquide
—— . —— : solution riche
– – – – – : solution pauvre

Q: flux de chaleur
G1: générateur 1
G2: générateur 2
A: absorbeur
C1: condenseur 1
C2: condenseur 2
E: évaporateur

figure 2.12

3.0 ÉTAT ACTUEL DE LA TECHNOLOGIE

Dans ce chapitre, une synthèse des caractéristiques des systèmes à absorption sur le marché et en phase de R & D a été faite. Les systèmes sont classés selon les cycles qu'ils utilisent (voir chapitre 2) et pour chacun d'entre eux, les conditions d'utilisation, les limites d'opération, les coefficients de performance, les fabricants le cas échéant, et des références sont données. De plus, pour les systèmes toujours à l'étude, l'étape atteinte dans le processus de R & D est indiquée. Tous ces renseignements apparaissent dans un tableau récapitulatif en fin de chapitre. Bien entendu, la justesse et l'actualité de ces renseignements dépendent de la documentation disponible.

3.1 SYSTÈMES SUR LE MARCHÉ

3.1.1 PACA de base

Basés sur ce cycle, les climatiseurs d'air résidentiels à absorption à gaz furent relativement populaires aux États-Unis dans les années 60. De nos jours, il n'y a plus que Dometic (anciennement Arkla) qui produit ces systèmes. On n'en vend plus qu'un petit nombre par année. Des problèmes de fiabilité et d'approvisionnement en gaz sont blâmés pour ce déclin. La paire NH_3/H_2O est utilisée dans ces systèmes.

Au Japon, ce cycle est couramment utilisé, en particulier dans le secteur commercial. Il y a cinq fabricants japonais: Ebara, Hitachi, Mitsubishi, Tokyo Sanyo et Hitachi Zosen. La capacité des machines offertes varie entre 80 kW et 10 MW. Tous les systèmes utilisent la paire $H_2O/LiBr$. La température maximale du cycle ne peut excéder 150 °C. Des températures supérieures entraîneraient des problèmes de corrosion. Du côté des basses températures, le cycle est limité à environ 0 °C, point de congélation de l'eau. La température de l'absorbeur, t_m, est limitée par la ligne de cristallisation de la solution de $H_2O/LiBr$.

Pour les systèmes utilisant la paire NH_3/H_2O, la température d'utilisation inférieure peut descendre jusqu'à environ -25 °C. La température supérieure par contre est fortement limitée par la pression de saturation élevée de l'ammoniac pour des températures moyennes. Cette paire n'est pratiquement jamais utilisée au Japon à cause de sa toxicité et de sa combustibilité.

3.1.2 Transformateur de chaleur de base

Ce cycle est employé dans tous les transformateurs de chaleur présentement sur le marché. Les systèmes actuellement en opération proviennent de

trois fabricants: Hitachi Zosen et Tokyo Sanyo du Japon, et GEA de l'Allemagne. Ces systèmes utilisent tous la paire $H_2O/LiBr$. On retrouve typiquement 60 % de lithium dans la solution. Leur capacité se situe entre 0,5 et 7 MW et ils ont un COP variant entre 0,46 et 0,48. On peut ainsi recycler environ la moitié de la chaleur résiduaire d'un procédé industriel.

La température maximum dans le cycle est limitée à approximativement 150 °C à cause de problèmes de corrosion qui apparaissent à des températures supérieures. Le saut de température (t_4-t_3) permis avec la technologie actuelle est d'environ 50 °C.

Les fabricants estiment de un à deux ans la période d'amortissement au Japon tandis qu'en Europe, on l'estime plus longue à cause d'une structure des prix de l'énergie différente. Le nombre de systèmes de ce type présentement en opération se situe autour de quinze, soit dix au Japon et cinq en Europe.

3.1.3 Système combiné compression/absorption

Il n'existe qu'une seule utilisation commerciale documentée dans le monde. Il s'agit d'une machine de 1 MW qui a été installée en Allemagne par TCH. On rapporte un COP de 9,1. Le cycle récupère de la chaleur latente à 95 °C et la réinjecte à 115 °C.

3.1.4 PACA à double effet

C'est le seul cycle multi-étagé présentement sur le marché. Tous les fabricants sont japonais et ils utilisent ce cycle pour refroidir ou chauffer de l'eau. Pour un refroidisseur d'eau, le système refroidit de l'eau de 12 °C à 7 °C et est lui-même refroidi par un circuit d'eau secondaire. La température d'entrée au condenseur est d'environ 32 °C et la température de sortie est entre 38 °C et 44 °C. Une tour de refroidissement est nécessaire pour évacuer les joules du circuit d'eau secondaire.

3.1.5 Autres systèmes

Tous les systèmes commercialisés utilisent un des quatre cycles présentés dans les sections 2.1 à 2.4. Les autres cycles, section 2.5 à 2.12, n'en sont qu'au stade de la R & D.

3.2 SYSTÈMES EN PHASE R & D

3.2.1 PACA de base

Peu de R & D est faite sur ce cycle puisque l'on juge qu'il a atteint ses limites. On se tourne maintement vers des cycles plus complexes. Toutefois, le cycle de base est encore utilisé dans certains cas, à cause de sa simplicité, pour tester des nouvelles paires de travail.

3.2.2 Transformateur de chaleur de base

Plusieurs projets de recherche sont en cours pour trouver une solution de travail pouvant excéder la limite de 150 °C permise par la paire traditionelle H_2O/LiBr. Ces projets sont menés entres autres par Gaz de France et GEA en Allemagne, en Suède et au Japon. Des essais avec la paire TFE/Pyr semblent prometteurs puisque la température de 193 °C a été atteinte avec un saut de 70 °C. Au Japon, l'utilisation de la paire NaOH/H_2O laisse entrevoir la possibilité d'atteindre 250 °C.

3.2.3 Cycle combiné compression/absorption

Ce cycle n'a pas encore été commercialisé, sauf dans un cas. Pourtant il existe des utilisations pour lesquelles il est adapté. Par exemple, la production de chaleur pour le chauffage communautaire à partir de chaleur résiduaire de procédés industriels. L'autre domaine d'utilisation qui semble le plus prometteur est la génération de vapeur de procédé. La paire H_2O/NH_3 se prêterait bien à de telles utilisations.

Une PACA de ce type devrait être soumise à des essais en conditions réelles à partir du début de 1990. Présentement, quatre montages expérimentaux sont testés, trois en Europe et un aux États-Unis.

3.2.4 PACA à double effet

Ce cycle est développé aux Etats-Unis, en Allemagne et au Japon. Depuis le milieu des années 70, la Columbia Gas Service Co. développe une PACA à gaz pour usage résidentiel. Le cycle fonctionne avec la paire H_2O/NaSCN et on espère obtenir des COP de 1,7 en chauffage et de 0,85 en refroidissement. Le projet arrive maintenant à maturité puisque Columbia est prêt à entreprendre des essais en conditions réelles.

Il y a également GRI aux États-Unis qui a contracté Battelle Columbus Division pour développer une PACA à gaz d'environ 10,5 kW destinée à l'usage résidentiel. Les COP visés par Battelle sont légèrement supérieurs à ceux de Columbia. Le début des essais en conditions réelles

devrait être imminent; GRI s'est engagé dans un autre projet avec Battelle-Columbus pour développer un climatiseur d'air résidentiel à double effet. Ce climatiseur aura aussi une option pour le chauffage. La construction d'un montage expérimental pour ce système était supposée se terminer à la fin de 1989. Le cycle fonctionne avec la paire $H_2O/LiBr$.

Au Japon, on vient de compléter le développement d'une PACA utilisant le cycle à double effet. Ce cycle a la particularité d'utiliser l'air directement comme source ou puits de chaleur. La machine fournit de l'eau chaude à 60 °C ou de l'eau froide à 7 °C.

3.2.5 PACA à double saut thermique

Un groupe de l'Université de Munich travaille sur le développement d'une PACA à double saut thermique. Un prototype de 25 kW a été construit. La machine a été conçue de façon à pouvoir fonctionner comme PACA à double effet ou à double saut thermique. Le but visé est de faire une machine pouvant à la fois produire de l'eau froide (4 °C) et de l'eau chaude (100 °C). On pense pouvoir obtenir un COP de 1,3 en chauffage et de 0,3 en refroidissement.

3.2.6 Transformateur de chaleur à double effet

On évalue le COP d'un tel système à 0,65, soit une amélioration de 30 % par rapport au cycle de base. Toutefois, le saut thermique demeure très modeste à 30 °C.

3.2.7 Transformateur de chaleur à double saut thermique

Ce cycle a été étudié au Japon et fait l'objet d'un projet de R & D chez Mitsubishi au Japon. Le projet arrive à maturité puisqu'un prototype de 77,2 kW a été fabriqué. Un COP de 0,31 a été obtenu en utilisant de la chaleur à 91 °C pour la recycler jusqu'à 151 °C. Le circuit de refroidissement fournissait de l'eau à 32 °C. La période d'amortissement d'un tel système est estimée de 2 à 3 ans.

3.2.8 Système compression/absorption à double saut thermique

Ce cycle est développé par deux groupes: l'Université de Munich et l'Université du Maryland. À Munich, un prototype de 5 kW permet la production de réfrigération à -20 °C et d'eau chaude à 80 °C avec un COP d'environ 1. On peut même atteindre des températures de 120 °C pour générer de la vapeur. Le cycle utilise la paire R22/E181.

Au Maryland, le montage expérimental fonctionne avec la paire NH_3/H_2O et a une capacité de 5 kW.

3.2.9 PACA à triple effet

Trane s'est associé à GRI au États-Unis pour développer un refroidisseur d'eau à triple effet. On vise la climatisation d'édifices commerciaux. Un COP de 1,5 en refroidissement a été calculé, ce qui représente une très forte amélioration par rapport à tous les autres cycles. On prévoit débuter un projet de démonstration en 1991.

3.2.10 PACA à deux boucles

Carrier aux États-Unis a développé ce cycle à deux boucles. La boucle supérieure utilise la paire $H_2O/LiBr$ comme fluide de travail tandis que la paire NH_3/H_2O circule dans la boucle inférieure. On vise le marché des édifices commerciaux de plus de 350 kW de réfrigération avec ce système. Le projet s'est arrêté en 1989 à cause des périodes d'amortissement anticipées trop longues.

3.2.11 PACA à échange de chaleur générateur/absorbeur (GAX)

La compagnie Trane a développé le cycle GAX pour de grands édifices commerciaux. Le projet a été complété en 1988 lorsqu'une étude économique a démontré des périodes d'amortissement trop longues. Seules les régions avec une forte demande en chauffage pourrait bénéficier d'un tel système.

Phillips Engineering a aussi développé une PACA à gaz utilisant le cycle GAX. Sa machine est toutefois axée vers le secteur résidentiel. On prévoit un prix de vente de U.S. $ 2 800. Phillips s'attend à commencer des essais en conditions réelles en 1990.

Ce cycle est également développé aux Pays-Bas. Les secteurs visés sont le chauffage de serre et d'édifices commerciaux et la climatisation.

3.2.12 PACA/transformateur de chaleur

Ce cycle en phase de développement laisse entrevoir la possibilité d'obtenir un bon COP et un grand saut thermique avec une seule machine. Un prototype a été testé en Allemagne. De la chaleur à 80 °C a pu être recyclée à 100 °C. Le prototype est entraîné par de la vapeur à 6-8 bars et refroidit par de l'eau à 25-30 °C. Des études ont montré qu'il serait possible d'avoir un saut thermique de 60 °C, soit de 70 °C à 130 °C.

CARACTERISTIQUES	État de la technologie - Systèmes commercialisés				
Numéro de cycle	1	2	3	4	5,6,7,8,9,10,11,12
Fabricants	Dometic, E.-U. Tokyo Sanyo Hitachi Zosen Ebara Hitachi Mitsubishi	Hitachi Zosen Kawasaki Tokyo Sanyo GEA Mitsubishi	TCH, RFA	Ebara Mitsubishi Hitachi Yazaki	
Fluides de travail	NH_3/H_2O $H_2O/LiBr$	$H_2O/LiBr$	NH_3/H_2O	$H_2O/LiBr$	
COP - Chauffage Refroidissement	1,75 0,6	0,46 à 0,48	9,1	2,53 0,90 à 1,07	
t_h	Max. 150 °C	115 à 150 °C	115 °C	> 44 °C	
t_m	< 95 °C	80 à 100 °C			
t_b	Min. -25 °C		95 °C	< 7 °C	
$t_h - t_m$		< 50 °C			
Capacité	< 10 MW	0,5 à 7 MW	1 MW	> 25 kW	
Remarques:			Une seule machine en opération.	PACA eau / eau sur le marché	
Utilisation	Résidentielle Commerciale Industrielle	Industrielle	Industrielle	Commerciale Industrielle	
Période d'amortissement					
Références	2, 7, 79, 80	2, 42	44	1, 2	7, 42, 47

Tableau 3.1

CARACTÉRISTIQUES	État de la technologie - R & D					
Numéro de cycle	1	2	3	4	5	6
Organismes de recherche	ENSIG, France; Uni. de Louvain, Belgique; ORNL, Energy Concepts	Gaz de France; GEA, RFA; Japon; Suède	TCH et Borsig RFA; ETH, Suisse; Uni. Maryland, USA.	Consortium du Japon; Columbia Gaz, GRI/ Battelle, USA; Uni. de Munich, RFA.	Université de Munich	
COP visés - Chauffage - Réfrigération				0,85 à 1,8 0,80 à 1,0	1,3 0,3	0,65 ----
Fluide de travail	H_2O/GYL TFE/QUN H_2O/NaOH-KOH-CsOH H_2O/ALKITRATE	NaOH/H_2O TFE/Pyr H_2O/LiCl-$LiNO_3$ TFE/DTGNMP	NH_3/H_2O	NH_3/NaSCN H_2O/LiBr		H_2O/LiBr
t_e (°C)	260	193 à 250	25 à 80	135 à 166	160	130
t_c (°C)	90 à 120		----------	34 à 45	70 à 100	100
t_a (°C)	0 à 60		- 15 à 60	2	2	30
Δt (°C)	30 à 80	70		32 à 43	-------	30
Remarques:			4 systèmes expérimentaux	Japon développe PACA eau/air et PACA air/air		
Période d'amortissement	1 à 2 ans			3 ans (Columbia)		
Capacité			5 à 500 kW	Résidentielle et Commerciale	25 kW pour le prototype	
Utilisation visée	Industrielle et Commerciale	Industrielle	Industielle	PACA à gaz, climatiseur	secteur commercial	
État de la R & D	Simulation et Prototype	Recherche	Prototype et projets de démonstration	Prêt pour essais en conditions réelles	Un prototype de construit. Projet de démonstration prévu.	
Références	6, 26, 28, 51, 53	6, 17, 22	44, 45, 49	7, 11, 12, 46, 72	11, 12	17

CARACTÉRISTIQUES	État de la technologie - R & D					
Numéro de cycle	7	8	9	10	11	12
Organismes de recherche	Mitsubishi, Japon	Université de Munich, RFA; Uni. du Maryland, USA.	GRI/Trane, USA	Carrier, USA	Trane, Phillips Eng., USA; Rendamax, Pays-Bas	Uni. de Munich, RFA; Université de Ljubljana, Yougoslavie
COP visés - Chauffage - Réfrigération	0,31 à 0,32	0,6 à 1,0	--------- 1,5	1,76 1,02	1,8 0,9	
Fluide de travail	H_2O/LiBr	NH_3/H_2O R22/E181		Boucle au haut H_2O/LiBr NH_3/H_2O	NH_3/H_2O	H_2O/LiBr
t_h (°C)	150	120				160
t_m (°C)	70	35				80 et 100
t_b (°C)	30	-20				30
Δt (°C)	60 à 80	135				60
Remarques:						
Période d'amortissement	2 à 3 ans			5,5 à 7,5 ans	1,5 à 6,5 ans	
Capacité	77 kW pour prototype	5 kW pour prototype	> 530 kW	> 350 kW	250 à 500 kW	80 à 100 kW
Utilisation visée	Industrielle		Commerciale	PACA dans édifices commerciaux	Résidentielle, commerciale, indu.	Industrielle
État R & D	Prototype testé	Essais sur Prototype	Projet de démonstration prévue pour 1991	Un montage expérimentale fut fait. Projet maintenant arrêté	Prêt pour essais en conditions réelles chez Phillips	Prototype testé
Références	17, 21	13, 18, 44	7	7	7, 31	11, 17

4.0 GROUPES ET ACTIVITÉS DE R & D

Cette section couvre les activités des principaux groupes impliqués dans la R & D des systèmes à absorption à travers le monde. Les renseignements fournis ont été obtenus à la suite de visites scientifiques et d'une recherche bibliographique étendue. Cette recherche s'est limitée aux articles publiés ou présentés lors de conférences durant les quatre dernières années. Les projets cités ne sont que brièvement détaillés. Des informations complémentaires peuvent être contenues dans les références données.

Les trois pays ayant les programmes R & D les plus ambitieux sont les Etats-Unis, le Japon et la République Fédérale d'Allemagne. Il y a environ de 30 à 40 centres faisant activement de la recherche en absorption dans le monde. Il s'agit de centres gouvernementaux, d'universités et d'organismes privés. La recherche peut être fondamentale ou appliquée. Les projets sont soit théoriques ou pratiques, i.e. impliquant certains équipements expérimentaux ou commerciaux. Les projets en développement visent les secteurs résidentiel, commercial ou industriel.

L'astérisque précédant le nom de certains centres de recherche indiquent que ces centres ont été visités.

4.1 AUTRICHE

*Université de technologie de Graz.

Une recherche a été entreprise pour trouver des nouvelles paires de travail pour les PACA de types I et II. Ces fluides permettraient d'élargir la gamme des conditions d'opération actuelles et d'obtenir un meilleur saut thermique. Un examen de différents fluides organiques a été fait et a montré que ce type de fluide se prête mal aux utilisations à haute température. Cependant, deux paires ont démontré un certain potentiel pour les applications à basses températures. Un prototype de 10 kW a été assemblé pour faciliter ces recherches. Les gens de Graz ont annoncé qu'ils interrompraient leurs activités sur les pompes à chaleur dans un proche futur.

Référence : 38.

Chercheurs : Moser, F.; Narodoslawsky, M.; Otter, G.

4.2 DANEMARK

Université de technologie du Danemark.

On y travaille au développement d'un transformateur de chaleur à deux étages pouvant recycler de la chaleur jusqu'à 300 °C. On commence par la mise au point d'un prototype de 2,3 kW.

Référence : 6.

Chercheur : H.J. Knudsen.

4.3 ÉTATS-UNIS

Columbia Gas System Service Corporation.

Columbia travaille depuis plusieurs années au développement d'une PACA à double effet destiné au secteur résidentiel (10,5 kW). On vise des COP de 0,80 en refroidissement et de 1,50 en chauffage. La PACA utilise la paire NH_3/NaSCN. On espère commencer les essais sur prototype cette année et les essais à pleine échelle l'an prochain (1991).

Références : 7, 72.

Chercheurs : S.E. Petty, H.C. Meacham, F.B. Cook.

*Energy Concepts Co.

Cette entreprise de consultants en énergie emploie une dizaine de personnes et est dirigée par Donald Erickson. Elle vit de projets de R & D principalement dans le domaine de l'absorption. On travaille présentement au développement de deux PACA, l'une destinée au secteur industriel pour la récupération de chaleur résiduaire, l'autre au secteur commercial.

La PACA industrielle de type I utilise un cycle de base. Un prototype d'une dizaine de kilowatts a été testé et a démontré la faisabilité technique du système. La nouveauté du système réside dans l'utilisation d'un absorbant nouveau genre. Cet absorbant est un mélange de trois substances traditionnellement employées comme inhibiteurs de corrosion. Le réfrigérant demeure l'eau. On a pu atteindre des températures d'opération de 260 °C sans entraîner de corrosion excessive. La prochaine étape du projet sera une démonstration à pleine échelle dans un procédé de distillation.

La seconde PACA développée servira à fournir eau chaude et eau froide simultanément. Encore une fois, Energy Concepts a innové en concevant une nouvelle solution de travail. On a conservé l'eau comme réfrigérant alors que le classique LiBr a été remplacé par un mélange ternaire composé de NaOH, KOH et CsOH. Cette solution permet un saut thermique de 7 °C à 80 °C avec des COP comparables aux systèmes existants. Ce système est présentement à l'essai sur un montage expérimental.

Références : 6, 41, 51, 52, 53.

Chercheurs : D. Erickson, E. Erickson, L. Howe.

*Gas Research Institute (GRI)

GRI est un des deux principaux organismes subventionnant la R & D en absorption aux Etats-Unis (l'autre est ORNL). C'est un organisme purement administratif et il n'y a donc aucune recherche faite intramuros. GRI tire ses budgets d'opération d'une taxe prélevée sur les ventes de gaz entre les états.

Du côté résidentiel, GRI finance les travaux de Battelle-Colombus Division pour développer une PACA utilisant un cycle à double effet. Il s'agit d'une machine de 3 tonnes (10,5 kW) adaptée au climat du sud des Etats-Unis et qui sera donc appelée à fonctionner principalement en mode de refroidissement. On a calculé pour ce cycle des COP de 1,8 en chauffage et de 0,94 en refroidissement. On prévoit commercer les essais sur prototypes en 1991. Sur le plan commercial, GRI s'est associé à Trane pour développer un refroidisseur d'eau à triple effet de 150 tonnes (525 kW). On espère atteindre un COP de 1,5 et on prévoit un projet de démonstration pour 1991. GRI a aussi subventionné des travaux effectués par le Brookhaven National Laboratory visant à diminuer le coût initial d'un refroidisseur d'eau à double effet.

L'étude s'est penchée sur le remplacement des matériaux de certaines composantes. De nouveaux échangeurs compacts ont aussi été assemblés. Un programme de simulation a été développé suite à cette étude et on a estimé à 1,0 le COP saisonnier.

GRI a aussi financé des travaux de recherche à l'Université du Maryland. On a étudié les performances théoriques de trois cycles combinés compression/absorption, le compresseur étant entraîné par un moteur à gaz. On a retenu deux cycles pour en faire une montage expérimental.

De plus, GRI supporte de nombreux autres projets de recherche sur les technologies de base inhérentes aux systèmes à absorption. Par exemple, les fluides de travail, les matériaux et les composantes prises individuellement sont étudiés.

Références : 19, 60, 61.

Chercheurs : Charles French, William Regan, William Dolan.

*Institute of Gas Technology (IGT)

Les plus récents efforts de recherche à IGT se sont concentrés sur les fluides de travail dans les systèmes à absorption. Une revue mondiale très exhaustive de toutes les combinaisons documentées de fluides a été effectuée pour être communiquée sous forme de rapport à tous les intervenants dans ce domaine.

Pour certains fluides, on a constaté un manque de données pour des conditions d'opération pouvant survenir dans une machine à absorption. Ces fluides pourraient être l'objet de futures recherches qui combleraient ces lacunes.

D'autre part, IGT vient d'entreprendre une étude générale sur l'état actuel des technologies de l'absorption. Cette étude a des objectifs très similaires au présent rapport. La principale différence est qu'elle se limitera aux systèmes commerciaux et résidentiels.

Références : 62, 63.

Chercheurs : Jaroslav Wurm, Robert Elkins, William Rush.

*Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

ORNL constitue l'un des principaux pôles de recherche sur l'absorption aux Etats-Unis. Robet DeVault qui est superviseur technique du programme sur l'absorption, agit régulièrement comme porte-parole du pays lors de conférences internationales. ORNL travaille sur plusieurs projets en parallèle. Certains projets sont développés à Oak Ridge même, alors que d'autres sont sous-contractés à des organismes extérieurs. Un projet entrepris en collaboration avec GRI et Trane est le développement d'un refroidisseur d'eau à triple effet destiné au secteur commercial. On a calculé un COP de 1,7 à 1,9 pour ce refroidisseur, soit un rendement de 18 à 63% supérieur (selon les fluides utilisés) à celui des meilleures machines à double effet actuellement fabriquées au Japon. L'optimisation et les calculs relatifs au système ont été faits à l'aide d'un programme de simulation. Les efforts de ORNL portent surtout sur le développement de nouvelles technologies de base au niveau des composantes tandis que Trane/GRI étudie le cycle de base.

D'un niveau de complexité plus élevé, un refroidisseur d'eau à 7 effets avec 3 circuits de refroidissement a aussi été conçu par ORNL. On vise un COP se situant entre 2,19 et 3,12. Toutefois, compte tenu de sa complexité, ce système ne sera sans doute jamais profitable au dire même de DeVault.

Trane et Carrier ont toutes deux travaillé avec ORNL pour développer une PACA pour le secteur commercial. Carrier a décidé d'exploiter un cycle à deux boucles tandis que Trane optait pour le cycle GAX. Dans les deux cas, on a fait un montage expérimental mais les résultats obtenus n'ont pas justifié la continuation des projets.

Parallèlement à ces projets, ORNL a développé quelques logiciels de simulation assez polyvalents pour les systèmes à absorption. Le dernier en date a été développé en Israël puis amélioré à ORNL pour le rendre plus flexible. Ainsi, le programme étant modulaire, il peut être adapté aux différents arrangements qui évoluent sans cesse. Un autre logiciel, développé par Ally, sert à concocter la solution de travail optimale pour un cycle donné opérant à des conditions connues. Ce logiciel a contribué à la conception d'un prototype de 10 kW chez Energy Concepts Co.

Pour mener ses propres recherches, ORNL dispose de deux boucles d'essais. L'une est conçue pour les mélanges NH_3/H_2O tandis que l'autre utilise la paire $H_2O/LiBr$. On dispose également d'un montage expérimental permettant de mesurer certaines propriétés (phase, densité, concentration) en fonction de la température. Les propriétés mesurées sont ensuite utilisées comme données d'entrée au logiciel développé par Ally.

Au niveau de l'instrumentation, ORNL a développé en 1987 une nouvelle technique permettant de mesurer les concentrations de réfrigérants en temps réel et in-situ, à tout endroit du cycle. La fibre optique est employée

comme sonde de mesure. ORNL collabore aussi avec Phillips Engineering au développement d'une PACA destinée au secteur résidentiel. Ce projet est abordé plus en détail dans la section souivante.

Références : 7, 64, 65, 66, 67, 68, 69.

Chercheurs : Robert DeVault, Frederick Creswick, Moonis Ally, P. Fairchild.

Phillips Engineering Co.

Phillips Eng. s'est associée à ORNL pour mettre au point une PACA air/air destinée au secteur résidentiel et aux petits commerces. La machine opère selon un cycle GAX et utilise la paire NH_3/H_2O. Les COP visés à l'origine du projet étaient de 0,7 en refroidissement et de 1,6 en chauffage. Lors d'essais récents sur un montage expérimental, un COP de 1,9 en chauffage a été obtenu. Un prototype est en cours d'assemblage et on prévoit commencer une campagne d'essais à pleine échelle en 1992.

Références : 7, 70.

Chercheurs : Ben Phillips, Robert Macriss.

Texas Technical University

On a fait plusieurs études théoriques sur les transformateurs de chaleur. On a entre autres comparé la performance d'un système utilisant la paire NH_3/H_2O avec le même système utilisant la paire $H_2O/LiBr$.

Référence : 71.

Chercheurs: A. Ertas, J. Luthan, J. Lawrence.

*University of Maryland (UM)

Les travaux de UM portent principalement sur le développement de pompes à cycle combiné compression/absorption. Un montage expérimental d'environ 5 kW est prêt à tourner. Le montage utilise la paire NH_3/H_2O et fonctionne selon le cycle de base. On prévoit passer à un cycle plus complexe lorsque le cycle de base aura fait ses preuves. La boucle a été assemblée à partir de composantes disponibles sur le marché. On signale des problèmes au niveau du compresseur lorsqu'il fonctionne à des températures élevées.

Références : 18, 19.

Chercheurs : R. Radermacher, Keith Herold.

4.4 FRANCE

*** Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-ENSIC-INPL, Nancy**

Ce laboratoire dirigé par le professeur Le Goff poursuit des recherches en absorption sur de nombreux fronts. On y effectue présentement des études technico-économiques comparant le coût unitaire de chauffage pour une multitude de systèmes et pour plusieurs pays. On travaille également au développement d'un absorbeur utilisant le concept de rectification inverse. D'autre part, des recherches plus fondamentales portent sur l'augmentation des transferts de masse et de chaleur par l'ajout de générateur de turbulence dans des absorbeurs à film ruisselant.

Tous ces travaux sont appuyés par l'utilisation de modèles numériques.

Références : 14, 27, 78.

Chercheurs : Pierre Le Goff, P.M. Ranger, M. Matsuda, J. Labidi, A. Ramadane, B. Schwarzer, B. Liu, R. Rivero.

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique, Toulouse

On étudie la paire H_2O/GYL afin de la substituer à la paire H_2O/LiBr dans les transformateurs de chaleur industriels. Il s'agit d'une étude théorique faite par simulation.

Référence : 26.

Chercheurs: N. Bennani, M. Prévost.

Gaz de France et Creusot-Loire

Des essais sont faits sur un prototype de 100 kW d'une PACA industrielle à haute température. La pompe utilise la paire H_2O/LiBr. Les essais ont donné des COP se situant entre 1,20 et 1,56 pour des températures d'évaporation de 55 °C à 65 °C et avec des températures utiles comprises entre 120 °C et 130 °C.

Référence : 6.

***Institut Français du Pétrole (IFP)**

On a développé une PACA utilisant la paire NH_3/H_2O de 1980 à 1989. Le projet a été abandonné en 89 pour des raisons économiques. La PACA innovait en utilisant un troisième fluide de travail, un hydrocarbure, pour améliorer son rendement.

Chercheur : Jacques Chéron.

Référence : 73.

4.5 ITALIE

Université de Naples

Un de leur projet de recherche consiste à évaluer la performance d'un transformateur de chaleur à deux étages. La performance est calculée pour divers arrangements. Le système étudié utilise la paire H_2O/H_2SO_4.

Références : 35, 36.

Chercheurs : P. Ciambelli, V. Tufano.

4.6 JAPON

Heat Pump Technology Center of Japan (HPTCJ)

Le HPTCJ gère depuis février 1988, un projet sur les PACA à haute technologie. Le projet est exécuté par 17 membres venant des universités, des instituts gouvernementaux, des compagnies de gaz et des fabricants. L'objectif est de développer une PACA à gaz pour les petites utilisations commerciales. Cette nouvelle génération de PACA utilisera un cycle à haute performance et des fluides de travail dont les propriétés sont connues.

Référence : 24.

Hitachi Co.

Hitachi termine la conception d'un refroidisseur/chauffe-eau (chiller/heater) à absorption à double effet avec refroidissement à l'air. Un tel système permettra l'élimination du circuit d'eau de refroidissement. Un prototype utilisant la paire $H_2O/LiBr$ a été construit. Ce projet s'est déroulé avec la collaboration de Tokyo Gas Co., Osaka Gas Co. et Toho Gas Co.

Référence : 20.

Chercheurs: T. Ohuchi, YU. Kunugi, M. Aizawa, S. Sugimoto, S. Kannah (Osaka Gas Co.), S. Takemoto (Toho Gas Co.).

Mitsubishi

Mitsubishi achève le développement d'un transformateur de chaleur à deux étages. Le prototype de 77 kW permet des sauts thermiques de 60 °C et peut recycler de la chaleur jusqu'à une température utile de 151 °C. Le prototype utilise la paire $H_2O/LiBr$ et est équipé de tubes à ailettes d'un nouveau genre.

Le développement d'un transformateur de chaleur pour des utilisations à haute température fait l'objet d'un second projet. La paire TFE/E181 (DMETEG) a été retenue et une boucle d'essai de 23 kW a été mise en place.

Références : 21, 22.

Chercheurs : A. Kawada, M. Otake, M. Toyofuku, H. Ota, G. Yamanaka.

Tokyo Gas Co.

Maintenant que le développement d'un refroidisseur/chauffe-eau (chiller/heater) à double effet avec refroidissement à l'air est chose faite, Tokyo Gas Co. entreprend le développement d'un climatiseur d'air à double effet refroidi à l'air, avec un COP équivalent au refroidisseur/chauffe-eau. Cette machine sera conçue pour être utilisée dans un édifice de superficie moyenne.

Référence : 23.

Chercheurs: S. Kurosawa, N. Nishiyama, Y. Nagaoka.

Yazaki Corporation

L'objectif d'un des projets en cours chez Yazaki est de développer un fluide absorbant pouvant être refroidi à l'air. On part avec du LiBr auquel on ajoute un sel organique, le LiI, et du HOC_2H_4OH (Ethylène glycole) comme additif d'antisolidification.

Référence : 25.

Chercheurs : H. Iizuka, K. Takahashi, T. Takigawa, N. Naganatsuya, J. Kuroda.

4.7 PAYS-BAS

*Rendamax

Rendamax est un fabricant de bouilloires qui développe depuis 1982 une PACA à gaz. L'objectif du projet est de mettre sur le marché au début des années 1990, une PACA d'une capacité de 250 à 1000 kW en chauffage. L'emphase est mise sur le développement d'échangeurs compacts et bon marché, d'une pompe à entraînement interne, d'une tour de refroidissement solide et bon marché et sur le design intégré des composantes. Un montage expérimental de 50 kW est présentement à l'essai. La PACA fonctionne selon un cycle GAX avec la paire NH_3/H_2O. Le marché visé est le chauffage de serres, d'édifices commerciaux et la climatisation dans les contrées méridionales d'Europe.

Référence : 28, 31.

Chercheurs : J. Bassols, A. Ohrt, J. Langreck, R. Schneider, N. Bedmarck, P. Voorter.

*Université de technologie de Delft

Le programme de recherche à l'université de Delft est très diversifié. Des travaux de recherche fondamentale sont faits sur les échanges de masse et de chaleur dans les absorbeurs. Les travaux se limitaient à un absorbeur

à faisceau de tubes horizontaux à l'origine mais ont évolué pour maintenant englober des absorbeurs à échangeurs compacts et à échangeurs à plaques verticales. Ce projet comporte une partie expérimentale et une partie de simulation. On a choisi la paire $CH_3OH/LiBr + ZnBr_2$ comme fluides de travail.

Un autre projet consiste à utiliser les technologies mentionnées ci-dessus pour développer une PACA pour le chauffage résidentiel. Un prototype de 10 kW est présentement à l'essai.

Pour le secteur industriel, on développe un transformateur de chaleur à haute performance utilisant la paire TFE/Pyr. Le prototype de 20 kW assemblé contribuera à valider un programme de simulation qui sera ensuite employé pour optimiser de nouveaux systèmes.

Finalement, le dernier projet entrepris porte sur un système combiné compression/absorption. On compte modéliser et tester différentes solutions de travail inoffensives pour la couche d'ozone.

Références : 29, 30, 74.

Chercheurs : A. Stolk, C. Machielsen, H. Becker, J. Westra.

4.8 RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE D'ALLEMAGNE

*Battelle Institute, Francfort

Une PACA industrielle à deux étages a été développé chez Battelle. Elle permettra de fournir de la chaleur à une température utile de 130 °C. La construction d'un prototype s'est terminée en 1989. Le prototype a été conçu de façon à pouvoir utiliser différents fluides de travail mais fonctionne avec la paire $H_2O/LiBr$. Les buts visés par ce projet sont d'augmenter le saut thermique, améliorer le transfert de masse et de chaleur durant l'absorption et la désorption, et accroître l'expérience nécessaire à l'intégration d'un tel système dans des procédés industriels. Le projet s'est terminé récemment faute de financement adéquat.

Références : 14, 16.

Chercheur : P. Schwerdt.

GEA Luftkuhlergesellschaft Happel GmbH

GEA est présentement le seul fabricant européen ayant commercialisé une PACA industrielle. On essaie maintenant de trouver de nouveaux fluides de travail qui pourraient remplacer la paire $H_2O/LiBr$. Cette nouvelle solution permettra d'opérer à des températures plus élevées et contribuera au développement d'une PACA à haute température.

Le développement d'un transformateur de chaleur à deux étages fait l'objet d'un autre projet. Un prototype de 20 kW a déjà permis la production de chaleur à 190 °C et un saut thermique de 70 °C.

Les laboratoires de GEA sont également équipés d'un prototype de PACA/transformateur de chaleur.

Références : 14, 17, 73.

Chercheur : H. Bokelmann.

*Université de Aachen, RWTH

Les chercheurs à Aachen travaillent présentement au développement de deux prototypes. Le premier d'une puissance de 10 kW vise le chauffage domestique. Il s'agit d'une PACA utilisant un cycle simple à fonctionnement cyclique. Ce projet a débuté en 1984 et arrive maintenant à maturité. Les fluides utilisés sont le CH_3OH/LiBr+LiOH.

Le second projet vise le développement d'une PACA intégrée dans un tube. On peut s'en servir en chauffage et en climatisation. La capacité du système dépendra du nombre de tubes désirés. Il s'agit d'un système modulaire. La partie absorbeur du tube est développé en collaboration avec le professeur Le Goff de Nancy. Le système utilise une pompe thermique, i.e. entraînée par les vapeurs de CH_3OH.

Des modèles numériques ont été développés en parallèle avec ces deux prototypes. De la simulation statique et dynamique sont faites.

Références : 14, 15, 73.

Chercheurs : K. Knoche, Manfred Roth, C.W. Seitz, H. Zerres, R. Strauss.

Université de Essen

L'Université d'Essen se concentre sur l'étude des fluides de travail dans les PACA. Environ 150 différents fluides ont été examinés. En plus des propriétés thermodynamiques, l'examen porte sur la corrosité et la stabilité thermique des fluides. Essen a collaboré avec GEA en leur fournisssant les fluides destinés aux utilisations à haute température.

Références : 6, 17, 73.

Chercheur : F. Steimle.

*Université de Munich

Si l'Université de Munich n'est pas la plus active en R & D en Europe, elle est sûrement la plus prolifique au niveau des publications. En effet, elle a publié de nombreuses études théoriques sur les technologies de l'absorption. Ces études ont porté entre autres sur l'analyse de cycles variés. Deux méthodes d'évaluation de cycle ont également été examinées de près. C'est la 2ième loi de la thermodynamique versus le concept d'exergie.

Sur le plan expérimental, un montage expérimental de 8 kW et un transformateur de chaleur de 35 kW à étages multiples sont étudiés. Le transformateur sert à recycler de la chaleur résiduaire à 80 °C jusqu'à une température utile de 140-150 °C.

Un troisième montage expérimental a été assemblé dans le cadre du développement d'une PACA à deux étages. Cette PACA de 20 kW a la particularité de pouvoir fonctionner selon un cycle à double effet ou selon un cycle à double saut thermique. Cette machine pourra donc être utilisée soit comme refroidisseur d'eau à haute performance, soit comme chauffe-eau. Ce design a été retenu pour faire l'objet d'une projet de démonstration prochainement. Il sera intégré à l'unité de chauffage/climatisation d'un hall d'exposition. On prévoit une capacité de 300 kW en refroidissement et de 700 kW en chauffage.

Le prototype d'une machine combinée PACA/transformateur de 20 kW a aussi été testé à Munich. Cette machine permet de recycler de la chaleur de 80 °C à 120 °C avec un excellent COP.

Les systèmes hybrides n'ont pas été oubliés. Deux prototypes sont présentement testés. Le premier d'une capacité de 10 kW en réfrigération utilise la paire NH_3/H_2O. Le second a une capacité de 5 kW en réfrigération, utilise la paire R22/DTG et peut, grâce à son cycle à double saut thermique, extraire de la chaleur à -20 °C pour chauffer de l'eau à 80 °C.

Références : 10, 11, 12, 13, 14, 18.

Chercheurs : Georg Alefeld, Felix Ziegler, Wolfgang Kern, Peter Riesch, Günther Feuerecker, Ivo Greiter, Jürgen Scharfe, Roland Kahn, Sebastian Demmel.

*Université de Stuttgart

L'Université de Stuttgart s'occupe de développer des nouvelles paires de travail. Leur travail des dernières années a porté sur la paire TFE/E181. D'une part, on mesure les propriétés physiques du mélange et d'autre part, on estime les performances possibles du mélange dans une machine thermique donnée à l'aide de modèles numériques.

Chercheurs : K. Stephan, R. Hengerer.

4.9 ROYAUME-UNI

Cransfield Institute of Technology, Bedford

L'institut travaille sur le développement d'un nouveau type d'absorbeur qui pourrait être intégré dans une PACA compacte. Le phénomène d'absorption est augmenté par des disques semi-immergés en rotation dans une solution concentrée d'absorbant.

Référence : 33.

Chercheurs: I. Smith, F. Swallow.

University of Salford

Les travaux de l'Université de Salford ont porté principalement sur les fluides de travail dans les systèmes à absorption. Des données recueillies expérimentalement ont permis d'évaluer différentes combinaisons de fluides.

Référence : 34.

Chercheurs: K. Patil, M. Kim, R. Best, M. Eisa, F. Holland, P. Diffory, G. Grover.

4.10 SUÈDE

Université de Technologie de Chalmers, Gothenburg

Des études techniques et économiques d'optimisation et de sensibilité ont été menées sur les transformateurs de chaleur à un étage. Un programme de simulation adapté à ce cycle a été développé pour ces études.

Des recherches plus pratiques sont aussi faites sur un regénérateur à film ruisselant sur un montage de laboratoire.

Références : 6, 32.

Chercheurs : T. Berntsson, L. Ahlby, P. Holmberg.

4.11 SUISSE

Eidgenoessische Technische Hochschule (ETH), Zurich

Trois différentes solutions organiques ont été testées pour être utilisées comme fluides de travail dans une PACA qui recyclerait de la chaleur à 100 °C jusqu'à une température utile de 200 °C. Une seule paire s'est révélée adéquate pour une telle utilisation.

ETH s'intéresse aussi au cycle combiné compression/absorption. Un montage expérimental de 15 kW qui utilise la paire NH_3/H_2O a été assemblé. Le montage a fourni des données utiles sur les coefficients d'échange du générateur, de l'absorbeur et de l'échangeur de chaleur interne.

Références : 37, 44.
Chercheurs : C. Trepp, M. Stokar

4.12 YOUGOSLAVIE

Université de Ljubljana

Cette université a entrepris, il y a maintenant trois ans, le développement d'une PACA/transformateur de chaleur à deux étages. Le premier étage est la partie PACA et le second étage est la partie transformateur de chaleur. Les deux étages peuvent fonctionner indépendamment. L'assemblage est commencé et on a déjà pu tester le générateur. Les premiers efforts d'optimisation porteront donc sur le générateur. La machine utilise la paire $H_2O/LiBr$ et aura une puissance de 10 kW.

Références : 76, 77.

Chercheurs : B. Gaspersic, J. Remec, N. Hartman, S. Ahr.

5.0 UTILISATIONS EXISTANTES

A partir de la documentation disponible, une étude sommaire des utilisations de PACA dans le monde a été faite. La grande majorité des études similaires ont porté sur les PAC en général, et il devient difficile d'en extraire les données pertinentes aux systèmes à absorption.

D'une façon générale, on peut dire que l'utilisation des PACA reste très marginale sauf au Japon et en Roumanie. Les utilisations les plus répandues sont le conditionnement d'air et l'intégration dans les procédés industriels pour le Japon et le chauffage urbain pour la Roumanie.

5.1 SECTEUR RÉSIDENTIEL

Aux Etats-Unis, les premiers climatiseurs d'air à absorption ont fait leur apparition dans les années 1950. Ils sont devenus relativement populaires dans les années 1960 et on dénombrait plus de 400 000 unités vendues au milieu des années 1970. Les ventes ont ensuite presque complètement cessé à cause de problèmes de fiabilité et d'approvisionnement en gaz naturel. Il n'y a plus maintenant que Dometic, anciennement Arkla, qui fabrique de tels systèmes. Ce sont des machines utilisant le cycle de base et la paire NH_3/H_2O.

Au Japon, les systèmes à absorption n'occupent qu'une part minime du marché résidentiel malgré une présence marquée dans le secteur commercial.

On ne rapporte ailleurs aucune utilisation de PACA dans le secteur résidentiel. De façon générale, on peut affirmer que la technologie actuelle ne permet pas de fabriquer des systèmes compétitifs pour les utilisations de faible puissance. Les efforts déployés pour percer ce marché portent sur des systèmes plus complexes et offrant un coefficient de performance nettement amélioré. Les Américains et les Japonais semblent être les plus près de toucher au but.

Références : 1, 7.

5.2 SECTEUR COMMERCIAL

De nos jours, c'est au Japon que les systèmes à absorption sont les plus populaires à cause d'une structure des prix de l'énergie favorable. Ils sont utilisés pour le chauffage et la climatisation de grands édifices. En 1986, ils représentaient 56% des ventes de systèmes de climatisation pour les édifices ayant une surface supérieure à 3000 m^2. Cette part de marché tombe à 9% pour les édifices ayant une surface comprise entre 700 et 3000 m^2.

Aux Etats-Unis, les systèmes à absorption furent relativement répandus dans le secteur commercial jusqu'à la fin des années 70. Les systèmes à compression de vapeur se sont ensuite imposés pour des raisons d'économie. Actuellement, leur utilisation n'est plus que très marginale; quelques refroidisseurs d'eau et quelques réfrigérateurs ont été installés en 1989 ne représentant qu'un faible pourcentage des systèmes installés.

Du côté du chauffage urbain, on rapporte quelques utilisations dont deux assez récentes en Suède. Ce sont des machines de grande capacité, 7 et 53 MW, fabriquées au Japon. De façon générale, leur rendement a été satisfaisant jusqu'à présent. Au moins dix autres systèmes d'importance étaient rapportés fonctionnels au Japon en 1988. Les systèmes ont la réputation d'être fiables et flexibles malgré certains problèmes dus à la corrosion. Leur utilisation pour le chauffage urbain est également courante en Roumanie. En 1987, on y dénombrait plus de 25 PACA d'une capacité supérieure à 2 MW.

Références : 1, 8, 41, 59, 75.

5.3 SECTEUR INDUSTRIEL

Il y a deux sortes de PACA utilisées dans l'industrie; les PACA de type I et les PACA de type II aussi appelées transformateur de chaleur.

En 1988, on rapportait 28 utilisations industrielles de PACA de type I. De ce nombre, 26 se trouvent au Japon, 1 au Costa Rica et 1 aux Pays-Bas. On compte aussi environ 15 transformateurs de chaleur, soit 9 au Japon, 3 en Allemagne, 1 en Corée, 1 aux Pays-Bas et 1 en Yougoslavie. Ces données sont tirées d'une enquête faite par J. Berghmans auprès des pays membres du IEA Heat Pump Center. Elles ont été complétées par les données recueillies par

CADDET et ayant fait l'objet d'une publication récente. De plus, on est sur le point d'amorcer la construction d'un transformateur de chaleur de quelques mégawatts dans une aciérie aux Pays-Bas. Le nombre d'utilisation par pays et par secteur d'activités est présenté dans les tableaux 5.1 et 5.2. Les fiches techniques de plusieurs de ces utilisations se trouvent dans l'annexe C.

UTILISATIONS INDUSTRIELLES DES PACA PAR PAYS

PAYS	NOMBRE	
	Type I	Type II
Autriche	0	0
Canada	0	0
Corée	0	1
Costa Rica	1	0
Etats-Unis	0	0
Finlande	0	0
Japon	26	9
Norvège	0	0
Pays-Bas	1	1
République Fédérale d'Allemagne	0	3
Suède	0	0
Yougoslavie	0	1

Tableau 5.1

UTILISATIONS INDUSTRIELLES DE PACA PAR SECTEUR D'ACTIVITÉS

SECTEURS D'ACTIVITÉS	NOMBRE	
	Type I	Type II
Chimie, pétrochimie	8	11
Pâtes et papier	7	0
Textile	6	0
Fournitures et équipements électriques	2	0
Alimentation	1	2
Brasserie	0	2
Bois	1	0
Produits manufacturés-métal	1	0
Produits manufacturés-plastique	1	0
Incinération	1	0

Tableau 5.2

L'examen des fiches techniques permet de tirer les conclusions suivantes:

- l'utilisation industrielle des PACA demeure très marginale sauf au Japon;
- aucune utilisation industrielle n'est rapportée au Canada ou aux Etats-Unis;
- les PACA de type I sont surtout utilisées dans les industries de la pétrochimie et la chimie, des pâtes et papier et du textile alors que les PACA de type II sont presqu'exclusivement utilisées dans les industries chimiques et pétrochimiques;
- les PACA de type II fonctionnent tous selon le cycle de base;
- les fabricants sont tous japonais sauf GEA en Allemagne;
- tous les systèmes utilisent la paire $H_2O/LiBr$;
- les PACA de type I servent principalement à la production simultanée d'eau chaude et d'eau froide ou encore au pré-chauffage de l'eau allant à la bouilloire;
- une grande partie des PACA de type II sert à produire de la vapeur à basse pression;
- la plupart des systèmes tirent leur chaleur d'entraînement de vapeur;
- le COP des PACA de type I est compris entre 1,5 et 2,15 alors qu'il se situe entre 0,47 et 0,49 pour les PACA de type II;
- le majorité des systèmes furent installés au début des années 80.

Références : 6, 42, 50.

6.0 UTILISATIONS POTENTIELLES AU CANADA

6.1 SECTEUR RÉSIDENTIEL

Pour ce secteur, une PACA peut remplir les mêmes fonctions qu'une pompe à chaleur à compression de vapeur. On peut s'en servir pour la climatisation ou encore pour réchauffer l'eau ou l'air. Ces deux technologies visent donc le même marché. Elles diffèrent cependant au niveau de leur énergie d'entraînement : l'électricité pour la pompe à compression de vapeur et le gaz pour la pompe à absorption.

Les deux facteurs principaux qui détermineront la technologie la mieux adaptée à une utilisation donnée sont le coût initial et le coût d'opération. Phillips Engineering Company qui s'apprête à mettre une PACA

résidentielle sur le marché, a estimé que le coût d'achat d'un tel système sera sensiblement le même que celui d'une pompe à chaleur électrique de milieu de gamme. Le coût d'opération devient donc le facteur déterminant dans le choix d'une technologie ou de l'autre. Ce coût est directement relié au ratio du prix du gaz au prix de l'électricité. Un ratio élevé avantagera les systèmes à compression de vapeur alors qu'un ratio bas favorisera les systèmes à absorption.

Pour comparer les deux technologies, il convient aussi de considérer leur rendement énergétique. Pour les PACA, on peut anticiper un COP de 1,8 en chauffage (à 8,3 °C) pour les machines en développement. Les PAC à compression de vapeur standard ont un COP d'environ 2,8 en chauffage.

On peut maintenant comparer les deux technologies en tenant compte du prix de l'énergie d'entraînement et du rendement énergétique. Pour ce faire, on multiplie le ratio des prix de l'énergie par le ratio des COP:

$$\frac{COP_{électricité}}{COP_{gaz}} = \frac{2,8}{1,8} = 1,56$$

Au Québec, prix du gaz / prix de l'électricité = 0,83.
Facteur d'opportunité : 1,56 x 0,83 = 1,29.

Le résultat obtenu est appelé facteur d'opportunité. Il représente le prix d'une unité de chauffage pour une PACA sur le prix d'une unité de chauffage pour une PAC électrique. Un facteur d'opportunité inférieur à 1 indiquera donc des conditions favorables aux PACA alors qu'un facteur supérieur à 1 montre des conditions avantageuses pour les PAC électriques.

Le prix du gaz naturel a été ajusté pour tenir compte du rendement à la pointe du brûleur.

Les prix de l'énergie variant grandement d'une province à l'autre, le calcul a été fait pour toutes les provinces à l'exception des provinces de l'Atlantique qui ne sont pas desservies par un réseau de gaz naturel. Les résultats de cet exercice apparaissent au tableau 6.1.

Provinces	Prix du gaz* / Prix de l'électricité	Facteur d'opportunité
Québec	0,83	1,29
Ontario	0,65	1,01
Manitoba	0,76	1,18
Saskatchewan	0,37	0,58
Alberta	0,49	0,65
Col. Britannique	0,59	0,92

Tableau 6.1

* Tiré de la référence # 55.

Cette analyse démontre que la Saskatchewan et l'Alberta seraient les provinces les plus propices à l'utilisation résidentielle de PACA et que la Colombie Britannique offre un certain potentiel.

Notons que cette analyse demeure grossière et que ce sont les tendances ressortantes qui sont à retenir. D'une part, on s'est fié sur les travaux de Phillips Engineering Company pour estimer le coût initial des PACA et d'autre part, les rendements des systèmes n'ont été comparés qu'en chauffage à une température de référence.

Les COP considérés dans ce calcul correspondent à une température ambiante de 8,3 °C. Des températures ambiantes plus basses favoriseront les PACA puisque le taux de diminution du COP avec la température est plus faible pour les PACA que pour les PAC.

Références : 7, 54, 55.

6.2 SECTEUR COMMERCIAL

Dans le secteur commercial, les systèmes peuvent être utilisés pour la réfrigération, le chauffage et la climatisation d'édifices et la production d'eau chaude. Les PACA sont donc en compétition avec les PAC à compression de vapeur. Toutefois, la structure des prix de l'énergie pour ce secteur est nettement plus favorable aux PACA que pour le secteur résidentiel; les prix du gaz sont moins élevés alors que les prix de l'électricité sont plus élevés que ceux du secteur résidentiel.

On a refait le même type d'analyse que celui présenté dans la section 6.1 et on a obtenu les résultats suivants :

Rapport de COP en refroidissement (à 35 °C):

$$\frac{COP_{électricité}}{COP_{gaz}} = \frac{3,0}{1,0} = 3,0$$

en chauffage (à 8,3 °C):

$$\frac{COP_{électricité}}{COP_{gaz}} = \frac{2,8}{1,8} = 1,56$$

Provinces	Prix du gaz * / Prix de l'électricité	Facteur d'opportunité refroidissement	Facteur d'opportunité chauffage
Québec	0,57	1,71	0,89
Ontario	0,43	1,29	0,67
Manitoba	0,41	1,23	0,64
Saskatchewan	0,19	0,57	0,30
Alberta	0,23	0,69	0,36
Col. Britannique	0,37	1,11	0,58

Tableau 6.2

* Tiré de la référence 55

Encore une fois, la Saskatchewan et l'Alberta ressortent comme étant les deux provinces les plus propices aux utilisations de systèmes à absorption. De plus, si l'on considère qu'au Canada la charge en chauffage excède largement la charge en refroidissement, tout le Canada, exception faite des provinces maritimes qui n'ont pas accès au gaz naturel, offre un certain potentiel pour le développement de systèmes à absorption.

6.3 SECTEUR INDUSTRIEL

L'utilisation de PACA dans l'industrie est un phénomène relativement nouveau puisque les installations présentement en opération datent pour la plupart du début des années 80. Le savoir-faire accumulé au cours des dernières années a permis de déterminer des conditions optimales d'utilisation pour les PACA de type I et de type II.

La PACA de type I nécessite de la chaleur d'entraînement à une température comprise entre 140 et 180 °C. Elle peut fournir de la chaleur utile jusqu'à environ 110 °C. Les PACA de type I actuellement en opération se retrouvent principalement dans des procédés nécessitant la production simultanée d'eau froide et d'eau chaude, le pré-chauffage de l'eau allant à la bouilloire ou la production de vapeur à basse pression. Les industries où de tels systèmes ont déjà été installés sont l'industrie de la chimie, du textile, des pâtes et papier, et des produits manufacturés.

Pour les PACA de type II, les conditions optimales d'utilisation sont :

- une quantité de chaleur résiduaire plus grande que la demande, idéalement le double;
- une source de chaleur sous forme de chaleur latente, de préférence de l'ordre de 1 MW ou plus;
- une température de la source de chaleur comprise entre 60 et 130 °C et une température de la demande de chaleur de 20 à 50 °C supérieure, jusqu'à un maximum de 150 °C.

Rappelons que ce sont là des conditions optimales. Les utilisations potentielles s'écartant légèrement de ces conditions ne doivent pas être systématiquement éliminées. Les industries les plus susceptibles de réunir ces conditions sont les industries de la chimie et pétrochimie, pâtes et papier, agro-alimentaires et les distilleries et brasseries. La PACA de type II peut alors être incorporée dans des procédés de distillation, évaporation, séchage, production d'eau chaude et/ou d'eau froide.

Les conditions optimales mentionnées découlent de la technologie existante. Des développements en cours laissent entrevoir la possibilité de fonctionnement jusqu'à des températures de 260 °C, ce qui élargirait considérablement le champ d'utilisation des PACA industrielles.

Le Japon est le seul pays où les PACA sont couramment employées dans l'industrie. Les secteurs les plus populaires sont la chimie et pétrochimie, les pâtes et papier et le textile avec 16, 7 et 6 installations respectivement. Il n'existe qu'une poignée d'installations dans les autres pays.

Au Canada, on évalue la capacité technique totale de récupération au moyen de PACA industrielles à environ 55 PJ par année (1978), dont 3 PJ dans les procédés de distillation en pétrochimie. Aux Etats-Unis, on a identifié un marché potentiel de l'ordre de 2 milliards $US.

Références : 2, 6, 42, 56, 57, 58.

7.0 RECOMMANDATIONS

Plusieurs pays s'activent depuis quelques années à mettre au point des systèmes à absorption. Les pays les plus actifs dans ce domaine sont le Japon, les Etats-Unis et les pays d'Europe de l'ouest. La majorité de leurs programmes de R & D ont vu le jour au début des années 80, suite au deuxième choc pétrolier. On voyait alors dans les systèmes à absorption une alternative intéressante pour une utilisation plus rationnelle de l'énergie. Outre une dépendance moindre envers les pays exportateurs de pétrole, cette technologie laisse entrevoir la possibilité de réaliser des économies appréciables par rapport aux systèmes existants pour certaines applications. Ces facteurs sont redevenus très d'actualité suite aux récents évènements dans le Golfe Persique. De plus, la conscientisation mondiale sur les problèmes environnementaux s'ajoute aux facteurs politique et économique lorsque de nouvelles technologies sont considérées. Ici encore, les systèmes à absorption ont l'avantage d'être plus sains que les systèmes conventionnels puisque d'une part ils utilisent des fluides ne contribuant ni à la déplétion de la couche d'ozone ni à l'effet de serre, et d'autre part, ils réduisent l'émission de CO_2, liée également à l'effet de serre, par une utilisation plus efficace de l'énergie primaire.

Il serait donc souhaitable que le Canada s'implique dans ce domaine. Dans un premier temps, une expertise doit être développée et seulement lorsque la technologie sera parfaitement maîtrisée, une introduction sur le marché pourra être entreprise. Cette expertise sera d'autant plus crédible qu'elle sera acquise sur un prototype expérimental. Le prototype servira du même coup à démontrer la faisabilité technique d'une future installation. Pour démarrer ce processus, il importe d'abord de choisir le type de système à absorption que l'on veut développer. Ce type est étroitement lié à l'application qu'on veut en faire. Le choix s'est arrêté sur un transformateur de chaleur, ou pompe à chaleur à absorption de type II, pour la valorisation d'effluents thermiques industriels.

Les raisons qui ont motivé ce choix sont exposées dans cette section. Les sytèmes qui auraient pu être développés pour chacun des trois secteurs, résidentiel, commercial et industriel, sont abordés et discutés. Les différentes options sont évaluées selon quatre critères, soit : le potentiel de l'application visée, la simplicité du système, la durée anticipée de la R & D et la possibilité d'apporter une contribution originale.

7.1 CRITÈRES DE SÉLECTION

7.1.1 Potentiel de l'application visée

Par ce critère, on veut s'assurer que l'on développera une machine conforme aux besoins canadiens. C'est-à-dire qu'il existe un marché assez vaste pour justifier les coûts associés au développement d'une nouvelle technologie. Naturellement, le système considéré devra être compétitif avec les systèmes existants.

7.1.2 Simplicité du système

Ce second critère s'explique de deux façons. Premièrement, conscient qu'il s'agit d'une nouvelle technologie, il serait téméraire d'entreprendre le développement d'un système d'un niveau de complexité trop élevé. La technologie de base est déjà relativement complexe et il est préférable d'éviter les complications superflues pour cette première approche. Deuxièmement, l'industrie subit encore les contre-coups d'une mauvaise publicité faite autour des premières machines sur le marché. Il semblerait que la technologie n'ait pas été assez mature et qu'on ait été confronté à des problèmes de fiabilité. Par conséquent, il est nécessaire de développer une machine particulièrement fiable et il va de soi qu'une machine plus simple est garant d'une plus grande fiabilité.

7.1.3 Durée anticipée de la R & D

Par ce troisième critère, on a voulu tenir compte de la durée anticipée pour faire entrer cette technologie dans les moeurs canadiennes. Les difficultés techniques à surmonter pour le développement d'un système donné sont prises en considération. On évalue aussi la période requise normalement pour l'introduction d'une nouvelle technologie dans le secteur considéré.

7.1.4 Possibilité d'apporter une contribution originale

On a retenu ce quatrième critère pour éviter de se lancer dans des travaux qui ont déjà été fait par d'autres. Certains gouvernements et certaines multinationales ont déjà investi des sommes de plusieurs millions de dollars dans le développement de systèmes à absorption. Il serait donc plus avisé d'innover par rapport à ces systèmes plutôt que de tenter de refaire des systèmes similaires. L'originalité des travaux canadiens sera également plus susceptible de susciter l'intérêt d'autres organismes, ce qui pourrait résulter en une éventuelle collaboration.

7.2 SECTEUR RÉSIDENTIEL

Une pompe à chaleur à absorption (PACA) de type résidentiel pourrait servir au chauffage l'hiver et à la climatisation durant les périodes chaudes. Ce sont là les mêmes fonctions que remplit une pompe à chaleur électrique et ces deux systèmes seraient donc en compétition. L'étude économique de la section 6 a démontré que les PACA auraient un avantage sur les PAC électriques à compression dans seulement deux provinces, la Saskatchewan et l'Alberta, représentant 19% de la demande d'énergie canadienne pour le secteur résidentiel. C'est donc dire que le marché potentiel est plutôt restreint et que le premier critère de sélection n'est pas rencontré.

C'est également le cas du second critère, la simplicité de la machine. On estime que les systèmes utilisant le cycle de base ont pratiquement atteint leur limites. Les efforts de développement portent actuellement sur des cycles à plus d'un étage. On parle de PACA à trois effets, à deux boucles, à cycle GAX et autres.

Quant à la durée anticipée de développement, elle est de plusieurs années pour les systèmes résidentiels. Le défi à relever est double; on doit d'abord faire fonctionner la machine et ensuite optimiser chacune de ses composantes à l'extrême. Cette optimisation est nécessaire pour réduire au mimimum le coût d'achat du système qui est critique pour les appareils domestiques. C'est un processus très long et l'association avec un manufacturier est fortement recommandé.

Le développement d'un appareil domestique ne rencontre pas non plus le quatrième critère. Les multinationales américaines et japonaises subventionnent depuis quelques années d'ambitieux programmes de R & D pour percer le marché résidentiel. Ces efforts n'ont pas encore abouti. Au Japon, les systèmes ainsi développés ne récoltent qu'une part minime du marché alors que ce pays a une structure des prix de l'énergie très favorable aux PACA. Il faut en conclure qu'il serait difficile pour le Canada d'apporter une contribution originale pouvant avoir un impact significatif sur le développement de systèmes domestiques.

Somme toute, il n'apparait pas du tout opportun de vouloir développer une PACA domestique. La technologie devra faire ses preuves dans un autre secteur avant d'être employée dans le secteur résidentiel canadien.

7.3 SECTEUR COMMERCIAL

L'étude économique de la section 6 indique qu'il existe pour les PACA un marché potentiel beaucoup plus propice dans le secteur commercial que dans le secteur résidentiel. Toutes les provinces à l'ouest du Québec réunissent les conditions requises pour que les systèmes à absorption y soient potentiellement viables. Ces provinces totalisent 73% de la demande d'énergie canadienne pour le secteur commercial.

Tout comme pour le secteur résidentiel, les systèmes à absorption à l'étude pour des applications commerciales ont recours à des cycles plus complexes que le cycle de base. Les systèmes les plus performants présentement sur le marché fonctionnent selon le cycle à double effet. Toute une série de cycles plus ou moins réalistes font actuellement l'objet de recherches (voir section 3.2) et ce champs d'étude est encore très ouvert.

La durée anticipée de la R & D avant la mise en marché s'approche de celle d'un appareil domestique. L'expérience a démontré qu'il faut compter environ une dizaine d'années. L'optimisation des composantes n'est toutefois pas aussi critique que pour le secteur résidentiel. Compte tenu de la grandeur des puissances en jeu, les coûts d'opération gagnent de l'importance par rapport au coût d'achat.

La possibilité pour le Canada d'apporter une contribution originale est très présente. De nombreuses études théoriques portant sur de telles machines ont été faites et certains concepts qui n'ont été qu'effleurés, mériteraient d'être explorés à fond. Des cycles inédits et des nouvelles paires de travail font régulièrement l'objet de publications mais peu d'entre eux se retrouvent sur le banc des concepteurs. Il suffirait d'identifier une combinaison gagnante pour innover dans ce domaine.

Si l'on examine comment le secteur commercial répond aux quatre critères de sélection, on en arrive aux conclusions suivantes :

- les chiffres présentés dans la section 6.2 indiquent qu'il semble y avoir un marché intéressant pour les systèmes à absorption. Il serait souhaitable de faire une étude plus rigoureuse pour identifier le type de machine à développer;

- il serait préférable de faire le développement d'un tel système après avoir acquis une expertise sur une machine plus simple car les futurs appareils commerciaux feront appel à une technologie assez complexe;

- pour diminuer la durée de la R & D, on peut envisager acquérir une machine sur le marché que l'on modifiera et améliorera.

7.4 SECTEUR INDUSTRIEL

Tel que mentionné dans la section 6.3, les PACA de type I et II trouvent leurs applications dans les industries chimiques et pétrochimiques, des pâtes et papier, du textile, agro-alimentaires, des produits manufacturés

et des distilleries et brasseries. La plupart de ces industries étant de grandes comsommatrices d'énergie, il existe un fort potentiel de récupération. Pour ces applications, la PACA de type I sera en compétition avec les systèmes mûs à l'électricité. Ces derniers seront avantagés dans bien des cas à cause des prix relativement bas de l'électricité au Canada. Par contre, ces comparaisons ne tiennent plus pour les PACA de type II, ou transformateur de chaleur. En effet, les transformateurs de chaleur n'ont besoins que d'un minimum d'énergie externe pour fonctionner. Leur énergie d'entraînement vient de la chaleur résiduaire à recycler et leur coût d'opération est donc très faible. Cela fait de ces systèmes une alternative très prometteuse. Une étude de Jeday et Le Goff va même jusqu'à affirmer que c'est la méthode la plus économique pour la valorisation d'effluents thermiques industriels.

Pour ce qui est de la simplicité des systèmes, on s'en tient généralement au cycle de base que ce soit pour une PACA de type I ou de type II. Puisque les PACA sont intégrées à des procédés industriels, on est prêt à sacrifier quelques pourcents au niveau de la performance pour s'assurer d'une plus grande fiabilité.

La durée anticipée de la R & D pour un système industriel est plus courte que dans les secteurs résidentiel ou commercial. Cela s'explique de deux façons. D'une part, la technologie à mettre au point est plus simple et d'autre part, les efforts nécessaires d'optimisation des composantes pour réduire le coût d'achat ne sont pas aussi importants.

En dernier lieu, on ne rapporte aucune utilisation industrielle de PACA en Amérique du Nord et qu'une poignée en Europe. Les projets de R & D dans ce domaine sont peu nombreux et très limités. Il existe donc une opportunité pour le Canada de s'afficher dans ce secteur.

En conclusion, le secteur industriel est le plus propice à l'introduction de systèmes à absorption au Canada. Le développement d'un transformateur de chaleur répond aux quatre critères de sélection qui ont été fixés.

7.5 FUTUR PROGRAMME DE R & D

Avant d'amorcer la conception du transformateur de chaleur, il faudra bien définir l'application à laquelle il est destiné. En identifiant l'industrie et le procédé les plus propices à son installation, on pourra connaître les conditions d'opération auxquelles le transformateur sera soumis.

La conception du prototype pourra ensuite commencer. Il s'agira d'une machine utilisant le cycle de base et une paire de fluides de travail conventionnelle. Une fois que le prototype sera au point, on pourra envisager une application industrielle à pleine échelle.

En parallèle avec ces activités, il faudra continuer à suivre les développements internationaux dans ce domaine.

De plus, un autre type de système abordé dans ce rapport suscite présentement beaucoup d'intérêt. Ce sont les systèmes hybrides compression/absorption. Ces systèmes offrent le meilleur des deux technologies puisque la compression permet d'obtenir des COP élevés et l'absorption requiert l'utilisation de fluides de travail sans danger pour l'environnement. Une étude plus approfondie de ces systèmes serait donc souhaitable.

ANNEXE A

Contacts professionnels

Contacts professionnels

La liste qui suit contient les noms et les coordonnées des personnes qui ont été consultées dans le cadre de ce projet.

Moonis R. ALLY
Project-manager
Oak Ridge National Laboratory
Martin Marietta Energy Systems, Inc.
P.O. Box 2008, Bldg. 3147, MS-6070
Oak Ridge, Tennessee 37831-6070
Tel.: (615) 576-8003
Fax : (615) 574-9338

Dr.Ir.J. BASSOLS
Energy Division
Rendamax
Hamstraat 76
P.O. Box 1035
6460 BA Kerkrade
The Netherlands
Tel.: 045-412851
Fax : 045-423779

Jos W.J. BOUMA
General Manager
Heat Pump Centre
Swentiboldstraat 21, 6137 AE Sittard
The Netherlands
Tel.: 31 4490 95319/224
Fax : 31 4490 28260

Jacques CHÉRON
Chef de projet
Institut Français du Pétrole
1 & 4 Av. de Bois-Préau, BP 311
92506 Rueil Malmaison Cedex
France
Tél.: 33 (1) 47.49.02.14
Fax : 33 (1) 47.49.04.11

Frederick A. CRESWICK
Energy Division
Oak Ridge National Laboratory
Martin Marietta Energy Systems, Inc.
P.O. Box 2008, Bldg. 3147, MS-6070
Oak Ridge, Tennessee 37831-6070
Tel.: (615) 574-2009
Fax : (615) 574-9338

Robert C. DEVAULT
Energy Division
Martin Marietta Energy Systems, Inc.
P.O. Box 2008, Bldg. 3147, MS-6070
Oak Ridge, Tennessee 37831-6070
Tel.: (615) 574-2009
Fax : (615) 574-9338

Robert ELKINS
Institute of Gas Technology
Energy Development Center
4201 W. 36th Street
Chicago, Illinois 60632-3898
Tel.: (312) 890-6447
FAX : (312) 890-6460

Don ERICKSON
Energy Concepts Co.
627 Ridgely Ave.
Annapolis, Md.
USA, 21401
Tel.: (301) 266-6521
Fax : (301) 266-6539

Helen ERICKSON
Energy Concepts Co.
627 Ridgely Ave.
Annapolis, Md.
USA, 21401
Tel.: (301) 266-6521
Fax : (301) 266-6539

Günther FEUERECKER
Physik-Department
Technische Unisersität München
Briefanschrift : James-Franck-Straße
8046 Garching / München
Allemagne
Tel.: (089) 32 09-25 32
Fax : (089) 32 09-23 17

Charles E. FRENCH
Manager
Residential Space Conditioning
Gas Research Institute
8600 West Bryn Mawr Avenue
Chicago, Illinois 60631
Tel.: (312) 399-8243
Fax : (312) 399-8170

Rolf HENGERER
Universität Stuttgart
Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik
Plaffenwaldweg 9
7000 Stuttgart 80
Allemagne
Tél.: 49 711 685 6102/3
Fax : 49 711 685 6140

Keith E. HEROLD
Department of Mechanical Engineering
The University of Maryland
College Park Campus
College of Engineering
Room 2149, Engineering Classroom Building
College Park, Maryland 20742
Tel.: (301) 454-5677

Laurence HOWE
Energy Concepts Co.
627 Ridgely Ave.
Annapolis, Md.
USA, 21401
Tel.: (301) 266-6521
Fax : (301) 266-6539

Wolfgang KERN
Physik-Department
Technische Unisersität München
Briefanschrift : James-Franck-Straße
8046 Garching / München
Allemagne
Tel.: (089) 32 09-25 32
Fax : (089) 32 09-23 17

Pierre LE GOFF
Laboratoire des Sciences du Génie Chimique
1, rue Grandville, B.P. 451
54001 Nancy Cedex
France
Tel.: 83.35.21.21
Fax : 83.32.29.75

C.H.M. MACHIELSEN
Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology
Delft University of Technology
Mekelweg 2
2628 CD Delft
The Netherlands
Tel.: (015) 78 44 45
Fax : (015) 78 56 02

Horacio PEREZ-BLANCO
314 Mechanical Engineering Bldg
Penn State
University Park, PA 16802
USA
Tel.: (814) 865-7842
Fax : (814) 863-4848

Peter RIESCH
Physik-Department
Technische Unisersität München
Briefanschrift : James-Franck-Straße
8046 Garching / München
Allemagne
Tel.: (089) 32 09-25 32
Fax : (089) 32 09-23 17

Manfred ROTH
Lehrstuhl für Technische
Thermodynamik
Schinkelstr. 8, 5100 Aachen
Allemagne
Tel.: 49 241 80 53 92
Fax : 49 241 40 38 26

William RUSH
Institute of Gas Technology
Energy Development Center
4201 W 36th Street
Chicago, Illinois 60632-3898
Tel.: (312) 890-6443
Fax : (312) 890-6460

William A. RYAN
Gas Research Institute
8600 West Bryn Mawr Avenue
Chicago, Illinois 60631
Tel.: (312) 399-8376
Fax : (312) 399-8170

Peter SCHWERDT
Battelle-Institut e.V.
Am Römerhof 35
D-6000 Frankfurt am Main 90
Allemagne
Tel.: (0 69) 7908-27 58
Fax : (0 69) 7908-86 od.-80

C.W. SEITZ
Lehrstuhl für Technische
Thermodynamik
Schinkelstr. 8, 5100 Aachen
Allemagne
Tel.: 49 241 80 53 99
Fax : 49 241 40 38 26

Hans STIERLIN
Präsident und Delegierter des VR
DAWP Creatherm A G
Münchwiesen 5, CH-8952 Schlieren
Suisse
Tel.: 01 / 730 69 03
Fax : 01 / 730 80 91

A.L. STOLK
Technische Universiteit Delft
Faculteit der Werktuigbouwkunde
Mekelweg 2
2628 CD Delft
Pays-Bas
Tel.: (015) 78 48 94
Fax : (015) 78 35 00

R. STRAUSS
Lehrstuhl füu Technische
Thermodynamik
Schinkelstr. 8, 5100 Aachen
Allemagne
Tel.: 49 241 80 53 99
Fax : 49 241 40 38 26

R. WASSENAAR
Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology
Delft University of Technology
Mekelweg 2
2628 CD Delft
The Netherlands
Tel.: (015) 78 44 45
Fax : (015) 78 56 02

J.J.W. WESTRA
Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology
Delft University of Technology
Mekelweg 2
2628 CD Delft
The Netherlands
Tel.: (015) 78 44 45
Fax : (015) 78 56 02

Jaroslav WURM
Institute of Gas Technology
Energy Development Center
4201 W 36th Street
Chicago, Illinois 60632-3898
Tel.: (312) 890-6447
Fax : (312) 890-6460

ANNEXE B
Outils de communication

ANNEXE B

Outils de communication

Août 29-31, 1990, Stockholm : Workshop on Concepts for Energy Savings in Heat Pumps and Refrigeration Systems. Organisé par The Royal Institute of Technology, Dept. of Thermodynamics and Refrigeration; Swedish council for Building Research; Institut international du froid, Commission E2.

Contact : Inga du Rietz
The Royal Institute of technology
Dept. of Thermodynamics and Refrigeration
S-10044, Stockholm
Suède
Tél.: 468 790 74 51, FAX : 46 820 3007.

Septembre 24-26, 1990, Graz : Third International Workshop on Research Activities on Advanced Heat Pumps. Organisé par Graz University of Technology.

Contact : Dr. Hans Schnitzer
Institut für Verfahrenstechnik
TU Graz, Inffeldgasse 25
A-8010 Graz, Autriche
Tél.: 0316/873 7461, FAX : 0316/827685.

Septembre 26-27, 1990, Graz : Workshop on Market Potential and Programmes to Overcome Impediments for acceptance of Space Conditioning Heat Pumps. Organisé par : Heat Pump Center : International Promotion Center, Graz.

Contact : IEA - HPC
Tél.: 31 4490 - 95224, FAX : 31 4490 - 28260.

Octobre 1-3, 1990, Munich : Fourth International Conference on Applications and Efficiency of Heat Pump Systems in environmentally sensitive times. Organisé par : BHR Group Limited.

Contact : L. Grove
Heat Pumps
BHR Group Limited
Cranfield
Bedford MK43 OAJ
Angleterre
Tél. : 44 234 - 750422, FAX : 44 234 - 750074.

Janv. 19-23, 1991, New York : Symposium on Innovative Applications of Absorption Machinery. Organisé par : Technical Committee 8;3 of ASHRAE.

Contact : Reinhard Radermacher
Dept. of Mechanical Engineering
The University of Maryland
College Park
MD 20742 - 3055, USA
Tél.: 1 301 454-8876, FAX : 1 301 454-8957.

Août 10-17, 1991, Montréal : XVIIIe Congrès international du froid, "Le froid sans frontières". Organisé par : Agriculture Canada et autres.

Contact : Steve Bettner
XVIIIe Congrès international du froid
3600 Casavant Boulevard Ouest
St-Hyacinthe, Québec
Canada
J2S 8E3
Tél. : 1 514 773-1105, FAX : 1 514 773-8461.

Septembre 30 - Octobre 2 Tokyo : Absorption Heat Pump Conference '91. Organisé par : Japanese Association of Refrigeration, The Japan Gas Association, The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association, Agency of Industrial Science and Technology, MITI.

Contact : Ms. Y. Miyazawa
Japanese Association of Refrigeration
San-ei Bldg., 8 San-ei-cho, Shinjuku-hu.
Tokyo 160, Japon.
Tél. : 81-03 359 5231, FAX : 81-03 359 5233.

ANNEXE C

Fiches techniques des utilisations industrielles

Utilisations industrielles - PACA Type I
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Aichi, Japon Textile	Costa Rica Textile	Kanagawa, Japon Usine de pellicules photographiques
Fabricant Entrée en fonction Utilité	Ebara Corporation 1971 Production simultanée d'eau chaude et d'eau froide	Ebara Corporation 1974 Production simultanée d'eau chaude et d'eau froide	Hitachi Août 1982 Production de vapeur pour le préchauffage de l'eau
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	Simple effet H2O/LiBr 8760	Double effet H2O/LiBr 8760	- H2O/LiBr 7000
Source à haute température Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_G) (kW)	Vapeur 147 - 1760	Vapeur 170 - 1030	Vapeur 151 90 1900
Source à basse température Evaporateur - te (°C) Evaporateur - ts (°C) Puissance (Q_E) (kW)	Eau de refroidissement 12 7 1050	Eau de refroidissement 17 12 1140	Eau de refroidissement 35 31 1285
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance ($Q_C + Q_A$)(kW)	Eau 10 55 2810	Eau 21 41 2170	Eau 50 92,2 3185
COP $(Q_A + Q_C)/Q_G$ Références	1,6 2	2,09 2	1,68 2

Utilisations industrielles - PACA Type I
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Aichi, Japon Textile	Tokushima, Japon Papier	Toyama, Japon Pâte à papier
Fabricant Entrée en fonction Utilité	Tokyo Sanyo Novembre 1981 Chauffage de l'eau pour la bouilloire et les procédés	Tokyo Sanyo Août 1982 Pré-chauffage de l'eau pour la bouilloire	Tokyo Sanyo Septembre 1982 Pré-chauffage de l'eau pour la bouilloire
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- H2O/LiBr 8000	H2O/LiBr 8000	- H2O/LiBr 8000
Source à haute température Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_G) (kW)	Vapeur 180 - 1650	Vapeur 160 - 2170	Vapeur 165 - 1050
Source à basse température Evaporateur - te (°C) Evaporateur - ts (°C) Puissance (Q_S) (kW)	Eau de rejet 38 28,5 1100	Solution de rejet 38,6 28,2 1450	Eau de rejet 46,2 40,8 740
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance ($Q_C + Q_A$)(kW)	Eau 57 73 2750	Eau 42,2 72,5 3620	Eau 45 80 1790
COP $(Q_A + Q_C)/Q_G$ Références	1,67 2	1,67 2	1,70 2

Utilisations industrielles - PACA Type I
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Yamaguchi, Japon Chimie	Oita, Japon Usine de semi-conducteur	
Fabricant Entrée en opération Utilité	Tokyo Sanyo Août 1982 Production de vapeur pour procédés	Ebara Corporation 1983 Production simultanée d'eau chaude et d'eau froide	
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- H_2O/LiBr 7000	- H2O/LiBr -	
Source à haute température Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_G) (kW)	Vapeur 183 - 1340	Combustion de gaz - - 1650	
Source à basse température Evaporateur - te (°C) Evaporateur - ts (°C) Puissance (Q_E) (kW)	Vapeur organique 60 50 940	Eau de refroidissement 17 7 1760	
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance ($Q_C + Q_A$)(kW)	Eau 80 90 2280	Eau 32 38 3340	
COP $(Q_A + Q_C)/Q_G$ Références	1,69 2	2,03 2	

Utilisations industrielles - PACA Type I
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Yamaguchi, Japon Chimie	Oita, Japon Usine de semi-conducteur	
Fabricant Entrée en opération Utilité	Tokyo Sanyo Août 1982 Production de vapeur pour procédés	Ebara Corporation 1983 Production simultanée d'eau chaude et d'eau froide	
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- H_2O/LiBr 7000	- H2O/LiBr -	
Source à haute température Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_G) (kW)	Vapeur 183 - 1340	Combustion de gaz - - 1650	
Source à basse température Evaporateur - te (°C) Evaporateur - ts (°C) Puissance (Q_E) (kW)	Vapeur organique 60 50 940	Eau de refroidissement 17 7 1760	
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance ($Q_C + Q_A$)(kW)	Eau 80 90 2280	Eau 32 38 3340	
COP $(Q_A + Q_C)/Q_G$ Références	1,69 2	2,03 2	

Utilisations industrielles - PACA Type II
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Dorten, RFA Transformation des aliments	Chiba, Japon Transformation du Caoutchouc	Kagoshima, Japon Distillation d'alcool éthylique
Fabricant Entrée en fonction Utilité	GEA/Kawasaki 1985 Récupération sur vapeur saturée	Tokyo Sanyo Décembre 1981 Production de vapeur pour chauffage de procédé	Tokyo Sanyo Janvier 1984 Production de vapeur pour chauffage de procédé
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	Simple H2O/LiBr -	Simple H2O/LiBr 8000	Simple H2O/LiBr 7200
Source de chaleur Evaporateur - te (°C) Evaporateur - tx (°C) Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance ($Q_E + Q_G$) (kW)	 100 100 100 100 -	Vapeur de rejet 98 88 98 88 5000	Vapeur d'alcool 80 80 80 80 1950
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Absorbeur - ts (°C) Puissance (Q_A) (kW)	 - 145 1 MW	Vapeur : basse pression 127 133 2530	Vapeur: basse pression 119 124 930
Eau de refroidissement Condenseur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance (Q_C) (kW)	 - - -	 26 32 2650	 20 30 970
COP $Q_A / (Q_E + Q_G)$ Période d'amortissement Références	- - 3	0,47 1 an 2, 5, 40	0,48 1.5 an 2, 5, 40

Utilisations industrielles - PACA Type II
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Niigata, Japon Distillation	Tokuyama, Japon Distillation	Corée Distillation
Fabricant Entrée en fonction Utilité	Tokyo Sanyo Février 1984 Production de vapeur	Tokyo Sanyo Juin 1985 Production de vapeur	Tokyo Sanyo Mai 1983 Production de vapeur
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- - -	- - -	- - -
Source de chaleur Evaporateur - te (°C) Evaporateur - tx (°C) Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance ($Q_E + Q_G$) (kW)	Vapeur de sortie 80 80 80 80 3450	Vapeur de sortie 122 79 125 91 2220	Vapeur de sortie 98 88 98 88 4890
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Absorbeur - ts (°C) Puissance (Q_A) (kW)	Vapeur à basse pression 111 - eau 116 - eau 1670	Vapeur : basse pression 134 - eau 139 - eau 1090	Vapeur: basse pression 127 - eau 132 - eau 2350
Eau de refroidissement Condenseur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance (Q_C) (kW)	Eau souterraine 15 20 1780	Eau de mer 27 30 1030	Eau d'une tour 31 - 2540
COP $Q_A / (Q_E + Q_G)$ Période d'amortissement Références	0,48 1 à 2 ans 5	0,49 1 à 2 ans 5	0,48 1 à 2 ans 2, 5

Utilisations industrielles - PACA Type II
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Shimonoseki, Japon Distillation	Tokai, Japon Distillation	Sin-Nanyo Distillation
Fabricant Entrée en fonction Utilité	Hitachi Juillet 1982 Production de vapeur	Hitachi Mai 1983 Production de vapeur	Hitachi Septembre 1984 Production de vapeur
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- - -	- - -	- - -
Source de chaleur Evaporateur - te (°C) Evaporateur - tx (°C) Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance ($Q_E + Q_G$) (kW)	Vapeur de sortie - 83 - 83 3450	Vapeur de sortie - 80,5 - 80,5 3950	Vapeur de sortie - 100 - 100 6980
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Absorbeur - ts (°C) Puissance (Q_A) (kW)	Vapeur à basse pression 100 - eau 111 - vapeur 1660	Vapeur : basse pression 100 - eau 112 - vapeur 1880	Vapeur: basse pression 90 - eau 143 - vapeur 3330
Eau de refroidissement Condenseur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance (Q_C) (kW)	Eau d'une tour 28 32 1790	Eau d'une tour 32 36 2070	Eau d'une tour 31 37 3650
COP $Q_A / (Q_E + Q_G)$ Période d'amortissement Références	0,48 1 à 2 ans 5	0,48 1 à 2 ans 5	0,48 1 à 2 ans 5

Utilisations industrielles - PACA Type II
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Amaki, Japon Récupération sur eau chaude	Fuji, Japon Distillation	Delfzijl, Pays-Bas Distillation
Fabricant Entrée en fonction Utilité	Hitachi Décembre 1984 Production d'eau chaude	Hitachi Mai 1985 Production de vapeur	Hitachi Septembre 1984 Production de vapeur
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	- - -	- - -	- - -
Source de chaleur Evaporateur - te (°C) Evaporateur - tx (°C) Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_E + Q_G) (kW)	Eau de rejet 95 85 95 85 720	Vapeur de sortie - 95 - 95 580	Vapeur de sortie - 100 - 100 13 780
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Absorbeur - ts (°C) Puissance (Q_A) (kW)	Eau chaude 95 - eau 120 - eau 350	Vapeur : basse pression 25 - eau 131 - vapeur 270	Vapeur: basse pression 127 - eau 150 - vapeur 6420
Eau de refroidissement Condenseur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance (Q_C) (kW)	Eau d'une tour 32 37 370	Eau d'une tour 32 37 310	Eau d'une tour 24 40 7360
COP Q_A / (Q_E + Q_G) Période d'amortissement Références	0,49 1 à 2 ans 5	0,47 1 à 2 ans 5	0,47 1 à 2 ans 4, 5

Utilisations industrielles - PACA Type II
Fiche technique

Endroit Secteur d'utilisation	Stuttgart, RFA Brasserie	Yougoslavie Transformation des aliments	Wesseling, RFA Chimie
Fabricant Entrée en fonction Utilité	GEA 1986 -	GEA 1986 -	GEA Prochaine -
Cycle Fluides de travail Facteur de charge (heures/année)	Simple H2O/LiBr -	Simple H2O/LiBr -	Simple H2O/LiBr -
Source de chaleur Evaporateur - te (°C) Evaporateur - tx (°C) Générateur - te (°C) Générateur - ts (°C) Puissance (Q_E + Q_G) (kW)	Vapeur résiduaire - 100 - 100 -	Vapeur résiduaire - 100 - 100 -	Vapeur résiduaire 97 94,5 97 94,5 -
Chaleur récupérée Absorbeur - te (°C) Absorbeur - ts (°C) Puissance (Q_A) (kW)	Vapeur : basse pression - 136 1400	Vapeur : basse pression - 144 1100	Vapeur: basse pression - 133 2000
Eau de refroidissement Condenseur - te (°C) Condenseur - ts (°C) Puissance (Q_C) (kW)	- - - -	- - - -	- - - -
COP Q_A / (Q_E + Q_G) Période d'amortissement Références	- - 42	- - 42	- - 42

ANNEXE D

Acronymes

ANNEXE D

Acronymes

CADDET :	Centre for the Analysis and Demonstration of Demonstrated Energy Technologies
ETH :	Eidgenoessische Technische Hochschule
GAX :	Generator/Absorber Heat Exchange
GRI :	Gas Research Institute
HPC :	Heat Pump Center
HPTCJ :	Heat Pump Technology Center of Japan
IEA :	International Energy Agency
IGT :	Institute of Gas Technology
JRAIA :	Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association
ORNL :	Oak Ridge National Laboratory
RWTH :	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
TCH :	Thermo-Consulting Heidelberg Gmbh

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

1) Kurosawa, Shigekichi : "Current States of Gas Air-Conditioning System in Japan"; article présenté à l'Advanced Absorption Workshop en octobre 1988 au Japon.

2) The Japan Refrigeration and Air-Conditioning Industry Association : "Absorption Heat Pumps in Japan".

3) Bokelmann, H.: "Industrial Heat Recovery with Heat Transformers - Practical Applications and Development of Advanced Systems", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, E.U., Avril 1987, Chap. 20.

4) Berntsson, T. : "Future Prospects for Industrial Heat Pumps in Europe", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, Etats-Unis, Avril 1987, Chap. 21.

5) Mashimo, K. : "Overview of Heat Transformers in Japan", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, E.U., Avril 1987, Chap. 19.

6) Berghmans, J. : "Application of Heat Pumps in Industry", IEA Heat Pump Center report No. HPC-R-5, Décembre 1988.

7) DeVault, R. : "Advances Absorption Technology Development in the United States", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 69-80.

8) "Statistical Panorama", The Air Conditioning, Heating + Refrigeration News, April 2, 1990.

9) Bäckström, B. : "Process Integration : Absorption Heat Pumps and Flue Gas Cleaning", Proc. of 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, 1990, p. 139-144.

10) Alefeld, G. : "Problems with the exergy", Brennst. Waerme-Kraft, V 40:3, RFA, Mars 1988, p. 72-80.

11) "Modern Absorption Technology at the Technical University of Munich", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 1, Mars 1989, p. 39-40.

12) Kern, W. : "A Two-Stage Absorption Heat Pump for Heating and Cooling", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 3, Septembre 1989, p. 22-23.

13) Ziegler, F. : "Double-Lift Compression-Absorption Heat Pump", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 3, September 89, p. 20-22.

14) Zegers, P. et Knobbout, J. : "R & D of Absorption and Adsorption Heat Pumps and Heat Transformers in the CEC Programme", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 6, No 4, Décembre 1988, p. 7-8.

15) Ohrt, D. : "Multi-Stage Absorption Heat Pump with Methanol/Water-Lithium Bromide", Technische Hochschule, Aachen, RFA.

16) Schwerdt, P. : "Two-Stage High Temperature Absorption Heat Pump Using Lithium Bromide / Water", Proc. of the Workshop on High Temperature Heat Pump, Hannover, Novembre 1989, p. 153-160.

17) Bokelmann, H. et Alefeld, G.: "Advances in Heat Transformers", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Mars 1990, Tokyo, Japon, p. 107-116.

18) Ziegler, F. et Alefeld, G. : Compression - Absorption Heat Pumps for High Temperature Applications", Proc. of the Workshop on High Temperature Heat Pumps, Hannover, Novembre 1989, p. 131-145.

19) Radermacher, R., Herold, K. et Howe, L. : "Combined Vapor Compression - Absorption Heat Pump Cycles for Engine-Driven Heat Pumps", Report No. : GRI-88/0288, Gas Research Institute, Chicago, Ill., E.U., Décembre 1988.

20) Ohuchi, T. et al. : "Development of an Air Cooled Double Effect Absorption Chiller/Heater", Proc. of the IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Mars 1990, p. 555-564.

21) Yamanaka, G. : "Research on Two-Stage Absorption Heat Transformer", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 1, Mars 1989, p. 6-8.

22) Kawada, A. et al. : "Absorption Heat Transformer with TFE/E181 pair", Advanced Absorption Workshop, Octobre 1988, Japon.

23) Nagaoka, Y. et al. : "Research on an Air Source Gas Absorption Heat Pump Air Conditioner", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 81-91.

24) Kashiwagi, T. : "Activities of New Research Project on Advanced Absorption Heat Pump in Heat Pump Technology Center of Japan", Advanced Absorption Workshop, Octobre 1988, Japon.

25) Iizuka, H. : "New Working Fluid Containing Ethylene Glycol for Air Cooled Chiller - 2", Proc. of the IEA 1990 Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, Mars 1990. p. 565-574.

26) Bennani, N. et al. : "Absorption Heat Pump Cycle : Performance Analysis of Water-Glycerol Mixture", Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 9, No 3, p. 257-263, 1989.

27) Jeday M. et Le Goff, P. : "Search for an Optimal Sorbent for Absorption Heat Pumps and Mechanical Mixing Machines : Pt. 2, Application to solutions in liquid ammonia", Int. J. Refrig., Vol. 11, No 3, Mai 1988, p. 164-172.

28) Bouma, J. et Poolman, P. : "R, D & D Programs on Heat Pumps in the Netherlands", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 4, Décembre 1989, p. 14-15.

29) Machielsen, C. : "Thermal Sorption Systems. Part 1, Introduction", Koeltechnick, Vol. 81:7, Juillet 1988, Pays-Bas, p. 11-15.

30) Machielsen, C. et al. : "Compact Heat and Mass Exchangers in Sorption Systems", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 6, No 4, Déc. 1988, p. 20-23.

31) Bassols, J. et al. : "A New Absorption Heat Pump for Space Heating", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 515-523.

32) Berntsson, T. et Holmberg, P. : "Some Aspects on Heat Transformer Optimization", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 1, Mars 1989, p. 8-11.

33) Swalow, F. et Smith, I. : "Vapour Absorption into liquid films on rotating discs", International Journal of Refrigeration, v. 12:5, UK, Septembre 1989, p. 291-294.

34) Patil, K. et al. : "Experimental Evaluation of Aqueous Lithium Halides as Single - and Double - Salt Systems in Absorption Heat - Pumps", Applied Energy, 34, 1989, p. 99-111.

35) Ciambelli, P. et Tufano, V. : "On the performance of advanced absorption heat transformers. Part 1. The two stage configuration", Heat Recovery Systems & CHP, UK, v. 8:5, 1988, p. 445-450.

36) Ciambelli, P. et Tufano, V. : "On the performance of advanced absorption heat transformers. Part II. The double absorption configuration", Heat Recovery Systems & CHP, UK, 1988, v. 8:5, p. 451-457.

37) Mattys, H. et Trepp, Ch. : "Working Fluids for High Temperature Sorption Cycles", International Journal of Refrigeration, UK, v. 12:6, Novembre 1989, p. 327-331.

38) Narodoslawsky, M. : "Proposal for New Sorption Cycle Working Pairs Based on Thermodynamic Considerations", IEA Heat Pump Center Newsletter, vol. 7, No 2, Juin 1989. p. 45-48.

39) Stierlin, H. et Ferguson, J. : "Diffusion Absorption Heat Pump", IEA Heat Pump Center Newsletter, vol. 6, No 4, Décembre 1988, p. 13-16.

40) Okamoto, G. : "Utilization of Absorption Heat Pumps in Japan". IEA Heat Pump Center Newsletter, vol. 2, No 2, Mai 1984, p. 7-9.

41) Davidson, W. et Erickson D. : "Absorption Heat Pumping For District Heating now Practical", ASHRAE Transaction, v. 94, Pt 1., 1988.

42) Berntsson, K.M. et al. : "Learning from Experiences with Heat Transformers in Industrial Processes", CADDET Analyses Series No 2, Décembre 1989.

43) Glaser, H. et Aurocher, H. : "Theoretical Cycles of Absorption Heat Pumps", Proc. of the NATO Advanced Study, Institute on Heat Pump Fundamentals, Espinho, Espagne, Septembre 1980, p. 333-351.

44) Ahlby, L. et Hodgett, D.L. : "Compression-Absorption Heat Pumps", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 90, p. 21-34.

45) Mucic, V. : "Compression - Absorption Heat Pumps", Proc, of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 391-400.

46) Meacham, H.C. : "Status of the Double-Effect Absorption Heat Pump (DEAHP)", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 537-543.

47) Alefeld, G. : "Applications of New Heat Pump Technology for Environmental Protection", Proc. of the 1990 IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 213-229.

48) Kaizaki, M. : "Development of Gas Heat Pumps in Japan", IEA Heat Pump Center Newsletter, Vol. 7, No 4, Décembre 1989, p. 12-13.

49) Mucic, V. : "Resorption Compression Heat Pump With Solution Circuit for Steam Generation Using Waste Heat of Industry as Heat Source", vol. 7, No 1, Mars 1989, p.14-15.

50) "Sharing Experiences", Proc. of a Seminar on Industrial Applications for Heat Pumps, Janvier 1988, Toronto, Canada, p. 31.

51) Erickson, D. et Howe, L. : "Development of a High-Temperature Absorption Working Pair", présenté à l'ASME Winter Meeting, San Francisco, CA, Décembre 10-15, 1989.

52) Erickson, D. : "Absorption Steam Compressor for Building Cogeneration", technology announcement, Energy Concepts Co.

53) Howe, L. : "Novel Absorption Heat Pump for Space Conditioning Buildings", technology announcement, Energy Concepts Co.

54) Young, D.J. et al. : "Operating Experience with Different Kinds of Air-Source Heat Pumps in Canadian Winters", Proc. of the IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Mars 1990, p. 285-295.

55) "L'Energie au Canada", Office nationale de l'énergie, Septembre 1988.

56) "Revue du programme des pompes à chaleur", rapport final, CNRC, Juin 1986, MAS dossier No 55SZ.31025-5-5010.

57) Pettigrew, M.G. : "Commercialization of Industrial Heat Pumps in the U.S.", Litwin Engineers & Constructors, Inc., Houston, Texas.

58) Yoshii, T. : "Future Prospects of Industrial Heat Pumps in Japan", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, Florida, E.U., Avril 1987, chap. 22.

59) Calm, J.M. : "Estimating International Heat Pump Use", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, Florida, Etats-Unis, Avril 1987, chap. 42.

60) Leigh, R.W. : "Cost Reduction in Absorption Chillers : Phase 2, Report no BNL-42502, Broohaven National Laboratory, Upton, NY, Etats-Unis, Février 1989, 102 p.

61) Gas Research Institute : "1991-1995 Research and Development Plan and 1991 Research and Development Program", GRI, Chicago, Illinois, Etats-Unis.

62) Macriss, R.A. et al, : "Absorption Fluids Data Survey : Final Report on Foreign Data", IGT, Illinois, Chicago, Avril 1987, 156 p.

63) Macriss, R.A. et Zawacki, T.S. : "Worldwide Survey of Absorption Fluids Data", HPC Newsletter, Vol. 6, No 4, Juin 1988, p. 25-28.

64) "Triple-Effect Absorption Chiller Using Two Refrigeration Circuits", NTIS tech. note, Dept. of Energy, Washington, DC, Février 1990, 1 p.

65) "Enhanced Computer Program for Modeling Absorption Heat Pump Systems", NTIS tech. note, Dept. of Energy, Washington, DC, Février 1990, 1 p.

66) "Seven-Effect Absorption Chiller using Three Refrigeration Circuits", NTIS tech. note, Dept. of Energy, Washington, DC, Février 1990, 1 p.

67) "Conceptual Design and Optimization of a Versatile Absorption Heat Transformer", NTIS tech. note, Dept. of Energy, Washington, DC, Mars 1988, 1 p.

68) Ally, M.R. : "Computer Simulation of Absorption Heat Pump Using Aqueous Lithium Bromide and Ternary Nitrate Mixtures", ORNL. Report no. : ORNL/TM - 10392, Juin 1988, 35 p.

69) Klatt, L. et al. : "Fiber Optic Refrigeration Cycle Monitor", Proc. of the tech. Symposium southeast on optics, electro-optics and sensors, Orlando, Florida, USA, May 17th 1987, 6 p.

70) Phillips, B.A. : "Development of an Advances Cycle Absorption Heat Pump for Residential Applications", Prof. of the DOE/ORNL Conf. : research and development on the heat pump for space conditioning applications, Washington, DC, E.U., 17 Avril 1988.

71) Ertas, A. et al. : "Comparaison of Vapor Absorption Heat Transformer with Opposite Characteristics Working Fluids", Proc. of the Conf. on Analysis and Design of Advanced Energy Systems : Applications. Présenté at the ASME Winter Meeting, 1987, Boston, MA, Etats-Unis.

72) Petty, S.E. et al. : "Status of the Double Effect Absorption Heat Pump", ASHRAE Transactions 1990, V. 96, Pt 1.

73) Bouma, J. : "Heat Pump R & D in Europe", Additional Proc. of the 3rd IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japon, Mars 1990, p. 63-72.

74) Machielsen, C.H.M. : "Research Activities on Absorption Systems for Heating, Cooling and Industrial Use", ASHRAE Transactions 1990, V. 96, Pt. 1, #AT-90-30-1.

75) Herold, Keith et Radermacher, Reinhard : "Absorption Heat Pumps", Mechanical Engineering, Août 1989, p. 689-73.

76) Hartman, N. et Gaspersic, B. : "Investigation of the Heat Transfer to Boiling $LiBr/H_2O$ Solution in a Flooded-Type Generator of an Absorption Unit", Proc. of the 3rd International Workshop on Research Activities on Advanced Heat Pumps, 24-26 septembre 1990, Graz, Autriche.

77) Arh, S. et Gaspersic, B. : "Development of a Two-Stage Laboratory Absorption Heat Pump/Transformer", Proc. of the 3rd International Workshop on Research Activities on Advances Heat Pumps, 24-26 septembre 1990, Graz, Autriche.

78) Jeday, M.R.; Le Goff, P.; Chekir, K. : "Comparaison technico-économique de plusieurs types de pompes à chaleur pour la valorisation d'effluents thermiques industriels", Proc. of the 3rd International Workshop on Research Activities on Advanced Heat Pumps, 24-26 septembre 1990, Graz, Autriche.

79) "Heat Pumps in Japan; Products and Technical Trends", seconde édition, publié par le Heat Pump Technology Center of Japan, Décembre 1988.

80) Kurosawa, S. : "Development in Utilization Technology for Absorption Heat Pumps in Japan", Proc. of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, Etats-Unis, avril 1987, chap. 25.